



LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**La conception d'un système de
nettoyage des panneaux
photovoltaïques.**

Réalisé Par :

SKITIOUI Salah

Encadré par :

P^f ElMoussaoui Hassan (FST FES)

Soutenu le 8 Juin 2018 devant le jury

Pr El Amrani El Idrissi Najiba (FST FES)

Pr Ahaitouf Ali (FST FES)

Pr Mechaqrane Abdellah (FST FES)

Remerciement:

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon professeur, **Pr EL MOUSSAOUI Hassan** qui m'a beaucoup aidé pour effectuer mon stage au laboratoire LSSC. Son écoute et ses conseils m'ont permis de cibler un sujet qui était en totale adéquation avec mes attentes.

Je tiens à remercier vivement **Dr BOUJODAR Youness** et **Dr AZEROUAL Mohamed**, pour leurs accueils, le temps passé ensemble et le partage de leurs expertises au quotidien. Grâce aussi à leur aide j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Ils furent d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je tiens à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille qui m'ont conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport de stage.

Table de matière:

Table de matière:.....	0
Table des figures:	4
Remerciement:	1
Introduction générale:	6
Chapitre 1 : L'énergie solaire:	7
1.Introduction:	7
2.L'effet photoélectrique:.....	9
3.L'effet photovoltaïque:.....	10
4.Les cellules photovoltaïques :	11
4.1.Présentation et fonctionnement des cellules photovoltaïques:.....	11
4.2.Les principales technologies solaires photovoltaïques:	12
4.3.Les détails concernant chaque une des technologies:	12
5.L'énergie Solaire Thermodynamique:	13
5.1.Les systèmes de concentration:	13
5.2.Les différents types de centrale Solaire thermodynamique: Erreur ! Signet non défini.	
Chapitre 2 : Les répercussions de l'accumulation de la poussière sur le rendement et la rentabilité des centrales PV et CST:.....	15
1. L'effet de la poussière sur le rendement des technologies solaire :	15
2. L'étude économique du nettoyage des panneaux photovoltaïque:.....	17
2.1. Présentation de la station JA:	17
2.2. L'étude économique du nettoyage des panneaux PV de la central JA:	19
Chapitre 3: L'élaboration du system responsable de la détection de la baisse de rendement: 19	

1. Principe de fonctionnement:.....	23
2. Le système d'acquisition des données:.....	23
3. Approximation des courbes et l'extraction de l'équation mathématique:.....	28
4. La solution pour réduire le bruits:	35
Chapitre 4 : Le système mécanique de nettoyage:	43
1. Présentation du système :	43
La modification des servomoteurs:	43
Le système de commande:	45
Conclusion:.....	49
Références:	50

Table des figures:

Figure 1 : Panneaux photovoltaïques	9
Figure 2 : Centrale solaire thermodynamique à tour.....	9
Figure 3 : L'effet photoélectrique	10
Figure 4 : L'effet photovoltaïque	12
Figure 5 : Type de centrale solaire thermodynamique.....	15
Figure 6 : Accumulation de la poussière sur des panneaux PV	17
Figure 7 : L'effet des événements de pluie sur l'efficacité des panneaux PV.....	18
Figure 8 : Comparaison de l'état d'encrassement de panneaux PV	19
Figure 9 : Robot nettoyeur des panneaux photovoltaïques	20
Figure 10 : System nettoyeur sans eau	21
Figure 11 : Système nettoyeurs	21
Figure 12 : Véhicule nettoyeur.....	22
Figure 13 : Schéma de branchement de la photorésistance.....	24
Figure 14 : Une image des fichiers écrit par le microcontrôleur sur la mémoire.....	25
Figure 15 : Une image du contenu des fichiers de l'irradiation et de la puissance.....	25
Figure 16 : La courbe de variation de l'irradiation durant un cycle solaire quotidien.....	26
Figure 17 : La courbe de variation de la différence de potentiel entre les bornes du panneau solaire durant un cycle solaire quotidien.....	26
Figure 18 : La courbe de variation du courant traversant la charge (675ohm) durant un cycle solaire quotidien	27
Figure 19 : La courbe de variation de la puissance produite par le panneau solaire durant un cycle solaire quotidien	27
Figure 20 : La courbe de la variation de la puissance en fonction de l'irradiation.....	28
Figure 21 : La fenêtre de l'outil "curve fitting tool" qui montre l'approximation de la courbe d'irradiation en utilisant la méthode de Fourier.....	29
Figure 22 : L'approximation de la courbe d'échantillons.....	30
Figure 23 : Un agrandissement d'une partie de la courbe de la puissance en fonction de l'irradiation.....	30
Figure 24 : Une partie de la matrice M	31

Figure 25 : Le script Matlab permettant de générer la matrice d'intervalle	32
Figure 26 : Une partie de la matrice interval.....	33
Figure 27 : Un agrandissement d'une partie de la courbe d'irradiation	34
Figure 28 : La caractéristique de la résistance en fonction de l'illumination	34
Figure 29 : La caractéristique expérimentale de la photorésistance	35
Figure 30 : Illustration du capteur après les modifications	36
Figure 31 : Capteur d'irradiation fabriqué en utilisant une cellule QFSOLAR 5514-4	36
Figure 32 : La courbe de variation de l'irradiation durant un cycle solaire quotidien	37
Figure 33 : La courbe de variation de la différence de potentiel entre les bornes du panneau solaire durant un cycle solaire quotidien	38
Figure 34 : La courbe de variation du courant traversant la charge (675ohm) durant un cycle solaire quotidien.....	38
Figure 35 : La courbe de variation de la puissance produite par le panneau solaire durant un cycle solaire quotidien.....	39
Figure 36 : La courbe de la variation de la puissance en fonction de l'irradiation	39
Figure 37 : Fenêtre curve fitting tool qui montre une approximation de la courbe de la puissance en fonction de l'irradiation	40
Figure 38 : Les différentes courbes obtenues par l'outil curve fitting	41
Figure 39 : Le système de nettoyage	43
Figure 40 : Le circuit intégré qui pilote le servomoteur après avoir ajouté le pont diviseur de tension.....	44
Figure 41 : Carte électronique à base d'un microcontrôleur ATMEL ATMEGA328p	45
Figure 42 : Vue globale sur le système de nettoyage	46
Figure 43 : Vue détaillée du système de commande.....	47

Introduction générale:

En vue des pertes considérables d'énergie engendrées par les débris et la poussière qui s'accumulent sur les panneaux solaires avec des solutions de nettoyage qui nécessitent l'intervention humaine et qui sont économiquement infructueuse car l'intervention humaine mène au gaspillage des ressources (l'eau) à un manque d'efficacité, et des charges importantes qui se résument principalement au salaire de la main d'œuvre qui peut atteindre des sommes très importantes selon les pays.

Tout au long de ce document on va proposer en une solution qui vise à totalement automatiser l'opération de nettoyage des panneaux photovoltaïques chose qui résulte en une moindre implication du facteur humain et sera économique en terme de ressources, précise et efficace.

L'opération de nettoyage que nous proposons inclut la détection d'une baisse de rendement dû à l'accumulation de la poussière sur la surface du panneau solaire en proposant une nouvelle méthode et en prouvant expérimentalement que celle-ci est réalisable et efficace.

Le premier chapitre va donner une vue globale sur l'exploitation de l'énergie solaire et les différents types de technologies utilisées en ce domaine.

Le deuxième chapitre montre à travers deux articles l'effet de l'accumulation de la poussière et des débris sur la surface des panneaux solaires et une étude économique qui met en avant l'aspect économique d'une opération de nettoyage des panneaux d'une centrale solaire PV (photovoltaïque).

Le troisième chapitre traite les étapes d'élaboration d'un système capable de détecter une baisse de rendement d'un panneau photovoltaïque et de lancer le nettoyage de celui-ci.

Le quatrième chapitre décrit la fabrication du prototype mécanique et du système électronique pour assurer le nettoyage d'un panneau photovoltaïque.

Chapitre 1 : L'énergie solaire:

1. Introduction:

Ces dernières années la production des gaz à effet de serre est en hausse suite à la demande d'énergie qui ne cesse de s'accroître, ces gaz nocifs pour la santé et l'environnement résultent principalement de la combustion de produit pétrolier qui sont une source d'énergie non renouvelable, d'où le détour de l'attention de l'humanité et spécialement de la communauté scientifique vers les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables plus précisément sources d'énergie renouvelable sont des sources d'énergie naturelles intarissable par rapport à l'échelle du temps humain est une partie de l'énergie émise par des phénomènes naturels récupérée par des dispositifs d'en la technologie varie selon la source, le but est de transformer l'énergie reçue en énergie électrique [1].

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire, par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet d'énormes quantités d'énergie dans l'espace. Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ $1\,367\text{ W/m}^2$.

Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie au cours du temps en fonction de la position du soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ $1\,000\text{ W/m}^2$ pour une surface perpendiculaire aux rayons [2].

L'exploitation de cette énergie se fait par deux principales technologies :

Les cellules photovoltaïques : appelé communément panneau solaire produisent de l'énergie électrique grâce au phénomène photovoltaïque, Il est le produit du choc des photons sur un matériau semi-conducteur, ces derniers transmettent leur énergie aux électrons ce qui provoque leurs détachements de l'atome, ceci génère une tension électrique[3].



Figure 1 : Panneaux photovoltaïques

Les centrales solaires thermodynamiques : ils utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques [4].



Figure 2 : Centrale solaire thermodynamique à tour

2. L'effet photoélectrique:

On désigne sous le nom d'effet photoélectrique tous les phénomènes électriques qui sont provoqués par l'action de la lumière sur la matière.

L'absorption de lumière par un solide peut entraîner l'éjection d'électrons dans le vide ou dans le milieu qui est en contact avec lui : on parle alors d'émission photoélectrique. L'absorption de lumière peut également augmenter la conductibilité d'un corps : on parle alors de photoconductivité.

Certaines chaînes de conducteurs éclairées de façon appropriée font apparaître des forces électromotrices d'où il résulte une transformation directe d'énergie lumineuse en énergie électrique : on parle alors d'effets photovoltaïques.

Les effets photoélectriques sont le plus souvent observés dans les solides ; ils peuvent cependant aussi concerner les liquides et les gaz.

Les trois effets : l'émission photoélectrique, photoconductivité et effet photovoltaïque, ont en commun le processus primaire d'absorption de la lumière. Dans tous les cas, les photons qui transportent l'énergie lumineuse transmettent toute leur énergie à la matière et disparaissent.

Ce sont les effets secondaires qui différencient les phénomènes observés.

Les effets photoélectriques et, spécialement, l'émission photoélectrique ont présenté une grande importance historique dans la découverte du caractère particulaire de la lumière. Ils sont à la base d'applications techniques nombreuses qui vont de la simple mesure d'un flux lumineux à l'enregistrement d'une image en vue de sa transmission par les canaux de la télévision [5].

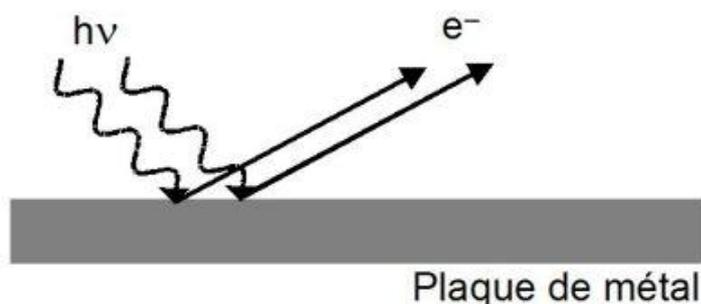


Figure 3 : L'effet photoélectrique

3. L'effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui par 90% des cellules photovoltaïques produites dans le monde.

L'effet photovoltaïque se produit quand les photons heurtent la surface d'un matériau photovoltaïque, Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau, du fait de l'énergie qu'ils gagnent, les électrons "s'excitent". Ils reviennent généralement à l'état d'équilibre, leur niveau initial en libérant l'énergie des photons sous forme de chaleur le matériau chauffe au soleil, mais il est aussi possible de récupérer cette énergie sous forme électrique. L'électron excité forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont de charges de signes opposés (-q ; +q).

Les cellules photovoltaïques sont des jonctions PN, faites en associant un semi-conducteur de type n avec un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Soumises à un champ électrique dans une jonction PN branchée sur un circuit extérieur, les paires électrons-trou vont se séparer et les électrons excités vont se mettre en mouvement dans une direction particulière : un courant électrique est créé, le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante. Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux [6].

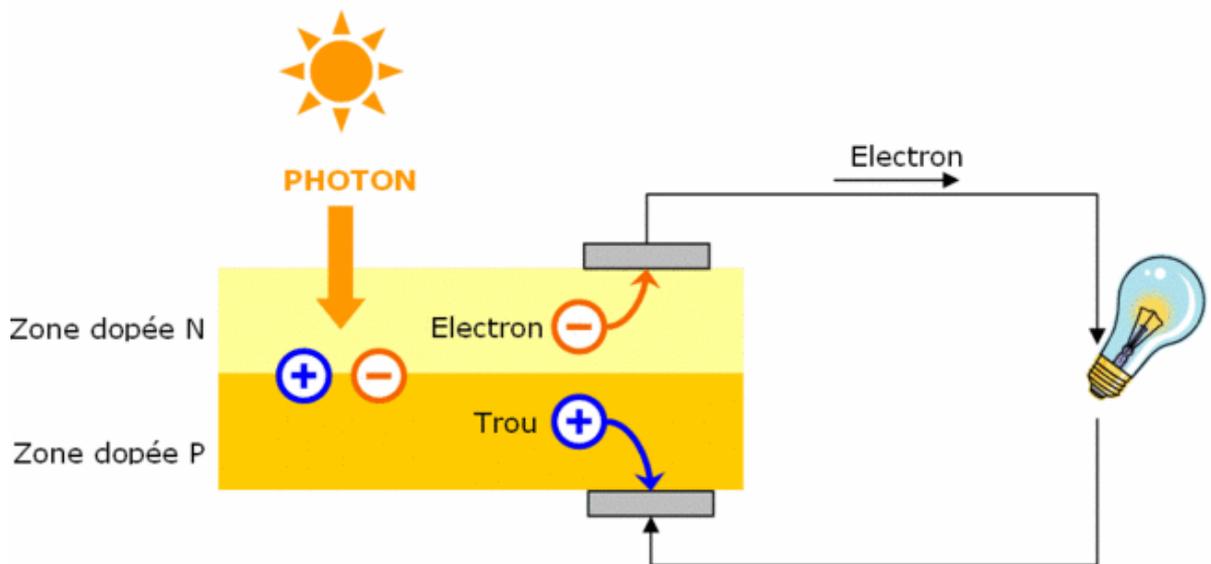


Figure 4 : L'effet photovoltaïque

4. Les cellules photovoltaïques :

4.1. Présentation et fonctionnement des cellules photovoltaïques:

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque, celui-ci permet au matériau de la cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives.

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu.

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux [7] :

- **La couche active ou l'absorbeur** constitué d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;
- **Les contacts métalliques avant et arrière** constituant les électrodes positives (+) et négatives (-) chargées de collecter le courant généré.

- **Des couches supplémentaires** comme un antireflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau, etc.

4.2. Les principales technologies solaires photovoltaïques:

- **les cellules au silicium cristallin**, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances, le rendement du module allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ.
- **Les cellules à base de couches minces** qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semi-conducteur à faible épaisseur sur des substrats variés, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 %.
- **Les cellules à base de photovoltaïque organique**, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

4.3. Les détails concernant chaque une des technologies:

Le silicium cristallin:

Les cellules au silicium cristallin sont fabriquées à partir de silicium purifié, matériau dans lequel sont insérés en quantité infime des atomes de bore et de phosphore afin de créer des zones chargées différemment et de former la jonction donneur-accepteur. Cette famille regroupe les filières du silicium monocristallin lorsque les cellules proviennent d'un lingot dont la maille cristalline (l'arrangement des atomes) est homogène, et celles du silicium polycristallin lorsqu'il existe plusieurs réseaux cristallins juxtaposés formant des grains dans une même cellule.

Le silicium amorphe:

Le silicium amorphe est obtenu par dépôts successifs de couches dopées et non dopées de silicium purifié en phase gazeuse. Le procédé de fabrication est moins onéreux, car il opère à basse température et utilise bien moins de matériau que le silicium cristallin. Cependant, le fait que les atomes de silicium soient désorganisés (pas de maille cristalline dans le matériau) conduit à de plus faibles rendements.

Les technologies couches minces:

Les technologies les plus courantes aujourd'hui produites industriellement sont :

- le **Tellure de Cadmium (CdTe)**, qui présente l'avantage d'une très grande stabilité dans le temps et d'un coût modéré ;
- le **Cuivre/Indium/Sélénium (CIS)**, le **cuivre/Indium/Gallium/Sélénium (CIGS)** et le **Cuivre/Indium/Gallium/Diséléride/Disulphide (CIGSS)**, qui présentent les rendements les plus élevés parmi les couches minces, mais à un coût plus élevé .
- l'**Arséniure de Gallium (Ga-As)** dont le haut rendement et le coût très élevé conduisent à en réserver l'usage essentiellement au domaine spatial. Toutes confondues, ces filières représentent à peine plus de 10% du marché photovoltaïque mondial actuel, mais on a vu récemment un essor de la technologie CIGS.

5. L'énergie solaire thermodynamique:

Le solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété de systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix des fluides caloporteur et thermodynamique ou du mode de stockage.

Les systèmes de concentration:

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Les systèmes à

concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels.

Le facteur de concentration:

Une caractéristique du système est son facteur de concentration. ce coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire : plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante[8].

$$\text{Facteur de concentration} = \frac{\text{surface du miroir}}{\text{surface du récepteur}}$$

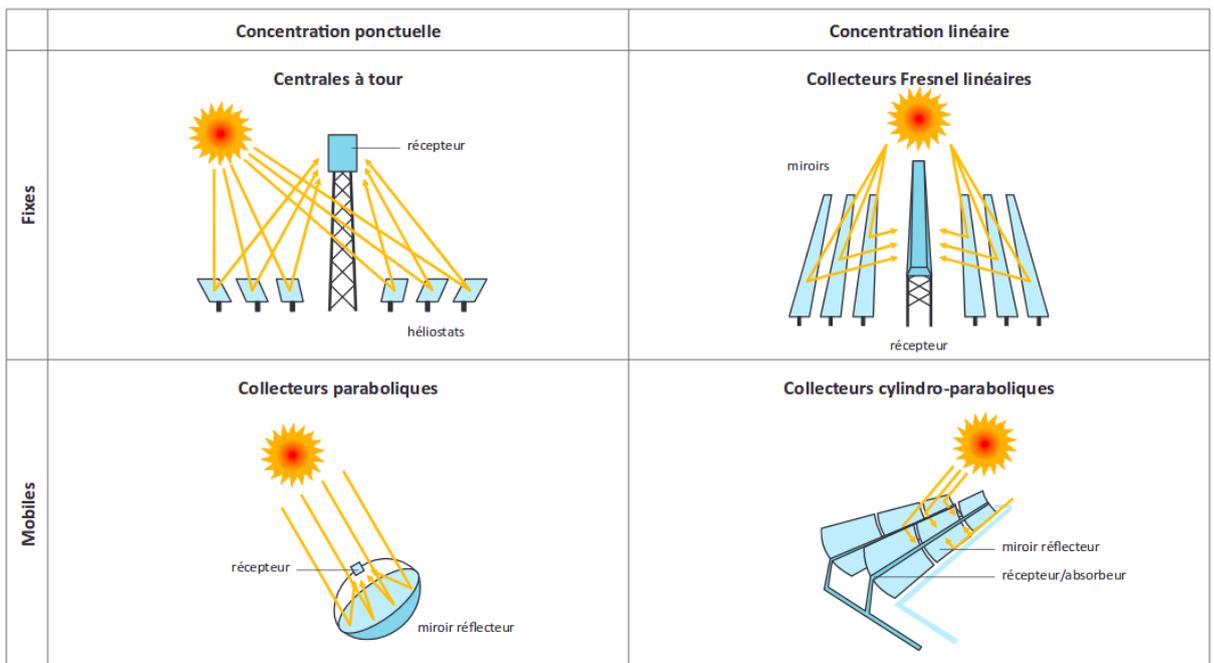


Figure 5 : Type de centrale solaire thermodynamique

Chapitre 2 : Les répercussions de l'accumulation de la poussière sur le rendement et la rentabilité des centrales PV et CST :

1. L'effet de la poussière sur le rendement des technologies solaire :

La rentabilité d'une centrale solaire thermodynamique est fortement affectée par l'efficacité du champ solaire: il est essentiel de maintenir la réflectivité des miroirs à un niveau élevé pour éviter la perte de puissance thermique. L'encrassement par la poussière est la principale cause de perte de réflectivité, les panneaux photovoltaïques son aussi affecté par l'accumulation de la poussière sur leurs surfaces, mais en moindre mesure que les CST, et le nettoyage des miroirs et des panneaux est une activité cruciale pour restaurer leurs réflectivités. Cependant, le coût élevé du nettoyage nécessite l'étude et l'identification d'un équilibre pour le planifier.

Des recherches sur l'encrassement des systèmes solaires ont été menées notamment au Moyen-Orient et en Inde. Une autre étude plus récente a examiné les effets de l'encrassement sur 250 sites surveillés par PowerLight. Comme plusieurs de ces sites se trouvent dans des régions où il pleut fréquemment, leur étude s'est concentrée sur des sites du sud-ouest des États-Unis où les longues périodes de sécheresse sont plus fréquentes. Entre les épisodes de pluie, les pertes dues à la souillure ont augmentée linéairement avec le temps avec une perte quotidienne moyenne de 0,2% [10].

Quelques études ont été menées pour tenter de relier les effets de la salissure dans le PV avec ceux du ST et ont montré que les CST ont plus de pertes dues à la salissure que le PV.

La principale différence entre ces systèmes réside dans le fait que les CST utilisent un système optique pour focaliser la lumière du soleil sur une zone plus petite, soit avec des réflecteurs ou des lentilles de Fresnel. Pour les miroirs l'encrassement peut affecter le système à la fois quand les rayons du soleil pénètrent dans le miroir et quand ils en sortent menant à des pertes plus importantes. De plus que les CST comptent sur le maintien de la radiation réfléchié dans un certain angle pour pouvoir atteindre le point focal, de petites déviations dans

la trajectoire du rayonnement qui n'affectent pas les panneaux PV peuvent éloigner le rayonnement du point de convergence des rayons lumineux. Un article a trouvé un lien entre le PV et le ST en comparant 5 systèmes de concentration de différents niveaux de concentration avec un panneau solaire. Ils ont trouvé une relation entre le niveau de concentration et les pertes observées à la saleté et ont également constaté que les systèmes réfléchissants étaient plus sensibles aux pertes de salissure que les systèmes PV.

La figure suivante démontre comment la poussière s'est accumulée sur un panneau PV.

L'accumulation de poussière peut avoir un effet important sur l'efficacité pendant de longues périodes de sécheresse [9].



Figure 6 : Accumulation de la poussière sur des panneaux PV

Une année de production d'électricité à partir d'un site photovoltaïque à Santa Clara, en Californie, a démontré comment la saleté diminue l'efficacité des installations photovoltaïques solaires. Les pertes de saleté ont leur plus grand impact pendant les étés longs et secs. Les pertes causées par l'accumulation de poussière ont été estimées à -0,0021% par jour en termes d'efficacité de conversion de l'énergie solaire . Le site PV présente une

diminution d'efficacité de 1.6%, après une chute de pluie en automne, le rendement a augmenté de 1.9%[9].

Le graphe ci-dessous montre la relation entre l'efficacité en % des panneaux photovoltaïques et les événements de pluie dans la région Santa Clara en Californie[9].

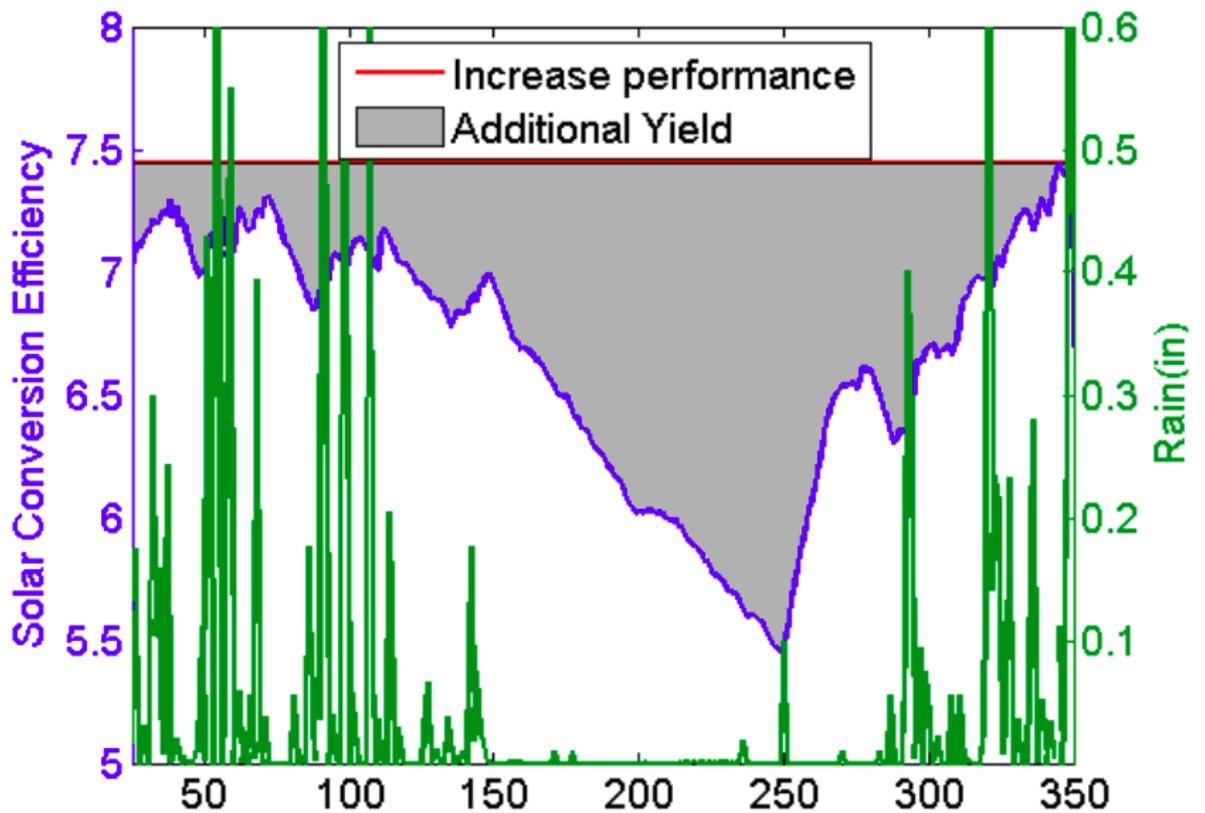


Figure 7 : L'effet des événements de pluie sur l'efficacité des panneaux PV.

2. L'étude économique du nettoyage des panneaux photovoltaïque:

Une étude a été conduite sur deux sites PV JA1 et JA2 révélant les détails économiques et la rentabilité d'une opération de nettoyage.

2.1. Présentation de la station JA:

La centrale solaire photovoltaïque de JA est située dans l'usine solaire JA dans la zone de haute technologie de la ville de Hefei, province de l'Anhui. La centrale solaire photovoltaïque est subdivisée en deux parties, la première JA1 avec une capacité de 1.4016

MWc et la deuxième JA2 avec une capacité de 8.26875 MWc. Les deux sont situés sur le même site. Hefei à une mousson subtropicale et un climat modéré et quatre saisons distinctes avec des précipitations appropriées. Il pleut moins au printemps, en automne et en hiver. Il fait chaud et il pleut beaucoup en été.

La pluie tombe principalement pendant la saison des pluies de prune de mai à juin. Selon l'expérience d'exploitation de la centrale photovoltaïque ces dernières années, les heures de génération d'énergie maximale atteignent 1090h à Hefei. L'irradiation maximale est proche de 1000W / m². Généralement, le meilleur moment pour produire de l'électricité est de juin à septembre. Afin de ne pas influencer la capacité de production d'énergie, nettoyer les modules photovoltaïques est une opération indispensable.

La capacité installée de la centrale photovoltaïque JA2 est de 8.26875 MWc. Il y a 33620 modules d'énergie solaire au total. La plupart de ces modules sont installés horizontalement (toit en acier). Seuls quelques toits en béton sont installés à un angle de 11 degrés. Pour les modules installés horizontalement, il reste de la poussière sur la surface des modules après la pluie, ce qui aura un impact sur l'efficacité des modules. L'image 1 et l'image 2 ci-dessous comparent l'état d'encrassement des modules installés horizontalement avant et après un événement de pluie en octobre 2014.



image 1



image 2

Figure 8 : Comparaison de l'état d'encrassement des panneaux PV

2.2. L'étude économique du nettoyage des panneaux PV de la central JA:

Après le nettoyage des modules photovoltaïques, la capacité de production accrue a atteint 25520 kWh avant la pluie le 31 octobre. Si le prix de l'électricité est de 0,68 RMB/kWh, l'augmentation des gains des modules nettoyés sera de $25520 * 0.68 = 17353.6$ RMB

Calcule des frais de nettoyage des modules:

1. Frais de main-d'œuvre 13427.6 RMB (jusqu'à présent, les modules photovoltaïques sont nettoyés par l'homme en Chine).
2. Charges d'eau: Environ 2100 tonnes d'eau sont utilisées. Les redevances d'eau pour le service d'exploitation de la ville de Hefei sont 2,65RMB/tonne. Ainsi, les frais d'eau totale est de $2100 * 2,65 = 5565$ RMB.
3. Les revenus provenant du nettoyage des modules photovoltaïques sont de 17353.6-13427.6-5565 = -1639RMB [10].

On tient à préciser que la main-d'œuvre et les ressources en chine sont les moins chères au monde.

Si l'opération de nettoyage est automatisé, il y aura une réduction très importante au niveau des frais de la main d'œuvre vu qu'elle se résumerait au personnel de l'asservissement et de l'entretien des équipements de nettoyage, et il y aura notamment une économie au niveau de l'eau vu que l'équipement de nettoyage n'utilisera que la quantité nécessaire d'eau pour nettoyer les panneaux solaires.

3. Solutions existantes pour entretenir les panneaux photovoltaïques :

Sur le marché il existe plusieurs alternatives automatisées pour le nettoyage des panneaux photovoltaïques, les plus courantes sont :

Les robots nettoyeurs :



Figure 9 : Robot nettoyeur des panneaux photovoltaïques.

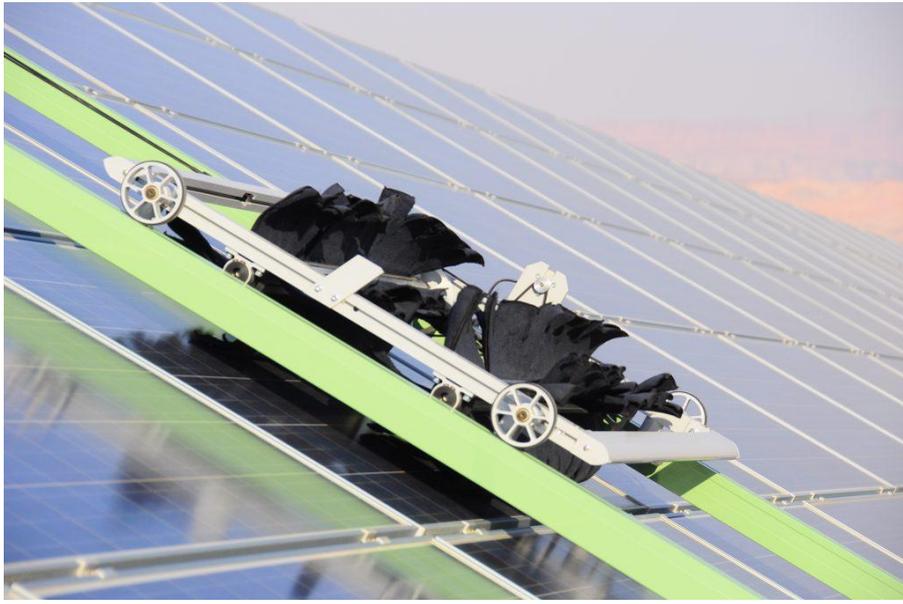


Figure 10 : System nettoyeur sans eau.



Figure 11 : Système nettoyeurs.



Figure 12 : Véhicule nettoyeur.

Les solutions présentées ont toutes des avantages et des inconvénients, l'inconvénient le plus important de ces 4 méthodes est l'intervention humaine en la planification du nettoyage et durant le nettoyage, le véhicule doit être conduit par une personne et les robots ne sont pas autonomes, ils sont guidés à distance.

Conclusion :

Les solutions de détection de la baisse de rendement et le nettoyage automatique des panneaux photovoltaïques sont coûteuses, propriétaires et d'un niveau de complexité élevé, seules les grandes installations industrielles qui ont les moyens de solliciter ces technologies, ce qui nous a amenés à trouver une solution moins complexe et facile à être implémentée même par des particuliers qui sera plus détaillée dans les chapitres suivants.

Chapitre 3: L'élaboration du système responsable

de la détection de la baisse de rendement :

1. Principe de fonctionnement:

Le système qui détectera la chute de rendement sera à base d'un microcontrôleur, qui sera programmé pour comparer la valeur théorique de la puissance à la valeur réelle produite pour décider si un nettoyage est nécessaire, le microcontrôleur collectera les données à travers un capteur d'irradiation solaire qui est connecté à une entrée analogique et un capteur INA219 communiquant sur le bus I2C les valeurs de la tension, du courant et de la puissance a la sortie du panneau solaire.

Le microcontrôleur détecte la baisse de puissance due à l'accumulation de la poussière en collectant la valeur de l'irradiation, qui est le paramètre d'une fonction qui calcule la puissance théorique et la comparera à la puissance réelle produite, la fonction sera établie préalablement, pour cela un système d'acquisition est utilisé pour collecter les valeurs de la puissance a la sortie du panneau chargé avec une résistance et les valeurs d'irradiation, après cela on traite les données collectées sur Matlab, on tracer la courbe de la puissance en fonction de l'irradiation, et finalement on approxime cette dernière en utilisant l'outil curve fitting disponible sur Matlab pour obtenir une fonction mathématique de la variation de la puissance en fonction de l'irradiation dans les conditions optimales (la surface du panneau est propre), on programme le microcontrôleur utilisé dans le système de nettoyage à relever la valeur de l'irradiation et calculer la puissance théorique qui devra être fournie par le panneau en utilisant la fonction citée préalablement, si la puissance calculée n'est pas conforme à la puissance relevée par le capteur , le microcontrôleur lance une opération de nettoyage.

2. Le système d'acquisition des données:

Pour parvenir à établir le graphe de la puissance en fonction de l'irradiation solaire, il a fallu collecter les données spécifiquement pour le panneau solaire en notre possession qui est de type amorphe de 32cm x10cm et d'un rendement avoisinant 8%, pour cela on a utilisé

un système Arduino NANO 3, car ce dernier dispose de plusieurs caractéristiques qui font qu'il est un bon choix pour notre application:

- Une interface USB pouvant communiquer avec un ordinateur facilitant la programmation, la collecte des données et le débogage.
- Le NANO 3 est compacte (43.18 mm × 18.54 mm) et consomme très peu d'énergie (une dizaine de mA quand il est alimenté par 5V), ce qui le rend parfait pour une application alimentée par batterie.
- Différent bus pour adresser des périphériques, notamment ISP pour ajouter une mémoire externe et I2C qui nous servira à communiquer avec des capteurs.
- Le microcontrôleur embarqué dans cette arduino dispose de plusieurs périphériques, dont un ADC de 10 bits.

En ce qui concerne le capteur d'irradiation, on a utilisé une photorésistance montée en diviseur de tension avec une résistance de 10 Kohms comme le montre la figure suivante.

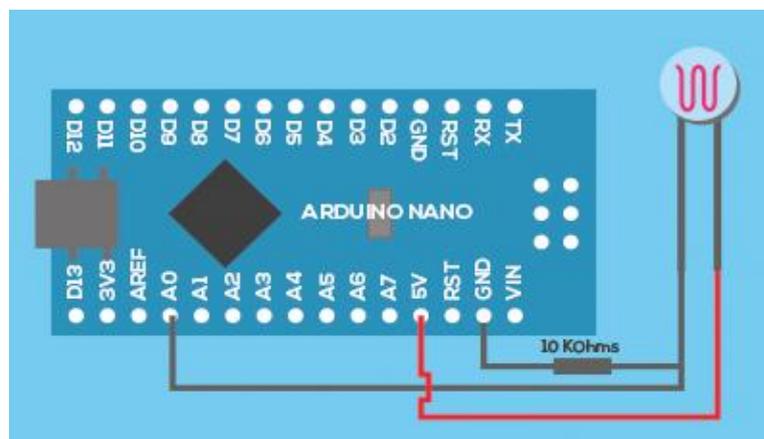


Figure 13 : Schéma de branchement de la photorésistance

Ce montage produit une sortie analogique variant de 0V à 5V en fonction de la luminosité ambiante, qui sera traitée par l'ADC du microcontrôleur et stockée dans la mémoire.

Le capteur de courant est un ACS712 un capteur de courant à effet hall qui mesure le courant à travers le champ électromagnétique qu'émet le conducteur dans lequel passe le courant, il fournit une valeur analogique qui sera interprétée par le microcontrôleur.

La mémoire externe est une carte micro SD utilisée pour sa grande capacité permettant d'enregistrer un grand nombre d'échantillons.

Après avoir branché tous les composants du système, programmer le microcontrôleur pour prendre un échantillon de courant, de tension, d'irradiation, et de puissance chaque seconde durant un cycle solaire quotidien et stocker les informations sur la mémoire externe. on récupère les informations qui consistent en plus de 45.000 échantillons de chaque une des grandeurs physiques mesurées sous forme de 4 fichiers:

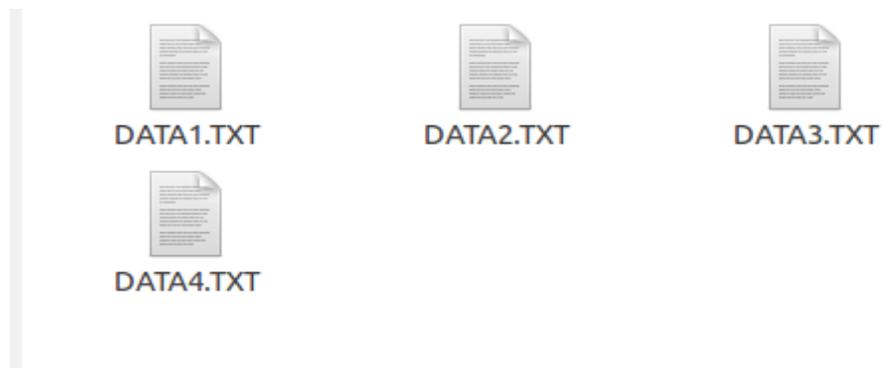


Figure 14 : Une image des fichiers écrit par le microcontrôleur sur la mémoire

Chaque un des fichiers contient des données sur une des grandeurs mesurées : data1 : L'irradiation, data2 : la tension, data3 : le courant en mA, data4 : la puissance en mW

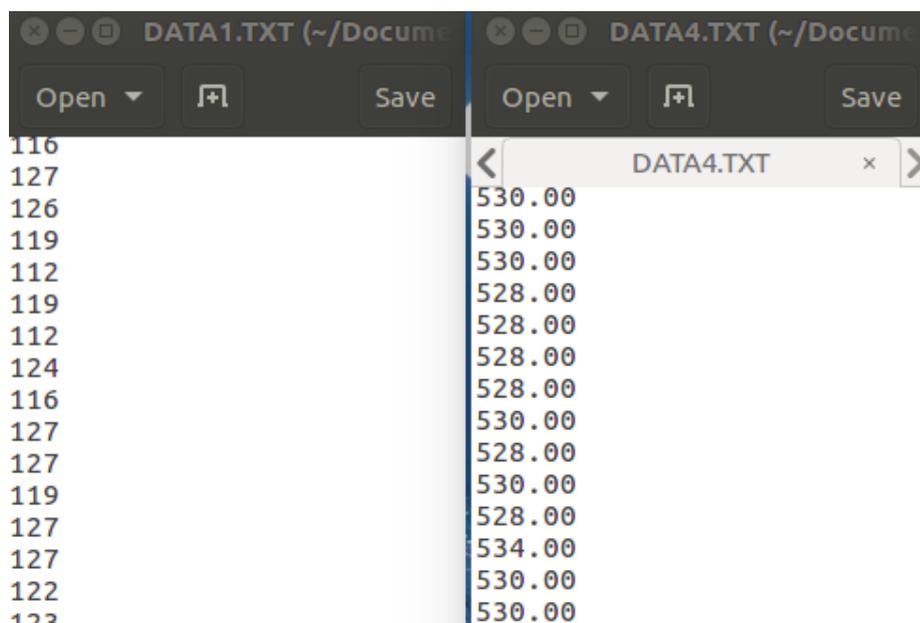


Figure 15 : Une image du contenu des fichiers de l'irradiation et de la puissance.

Le microcontrôleur écrit des fichiers texte contenant les valeurs numériques directement sur la mémoire.

Après avoir traité les données sur Matlab on obtient les courbes suivant:

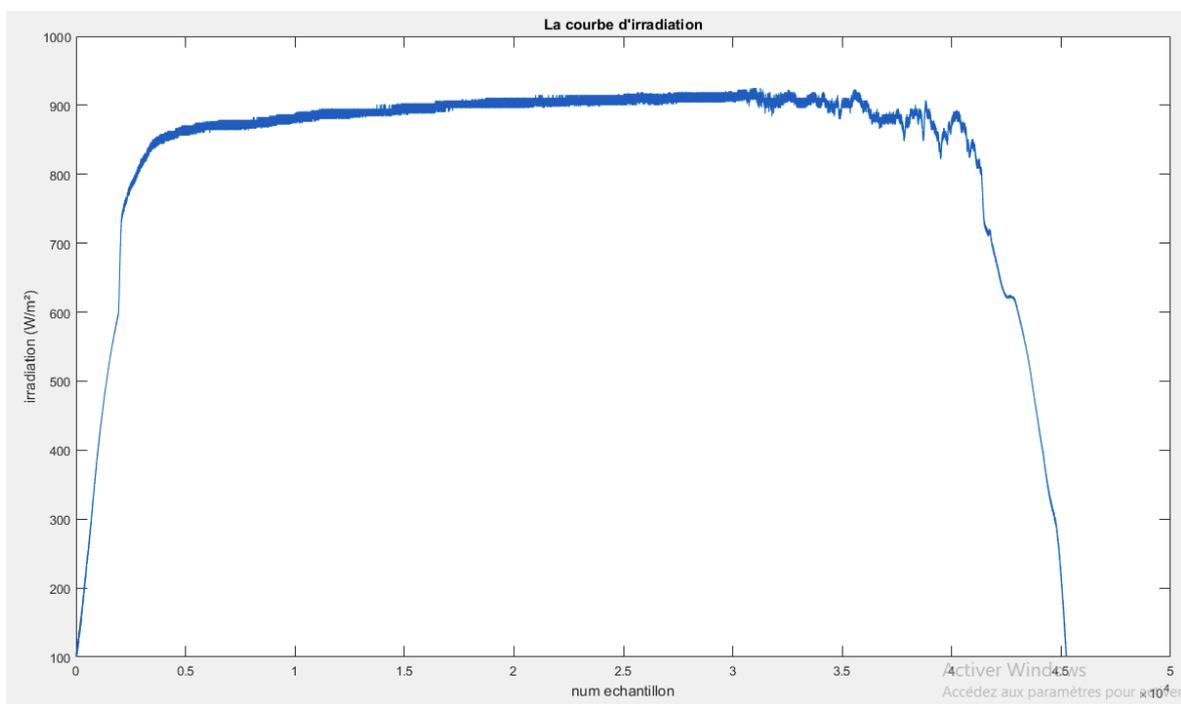


Figure 16 : La courbe de variation de l'irradiation durant un cycle solaire quotidien.

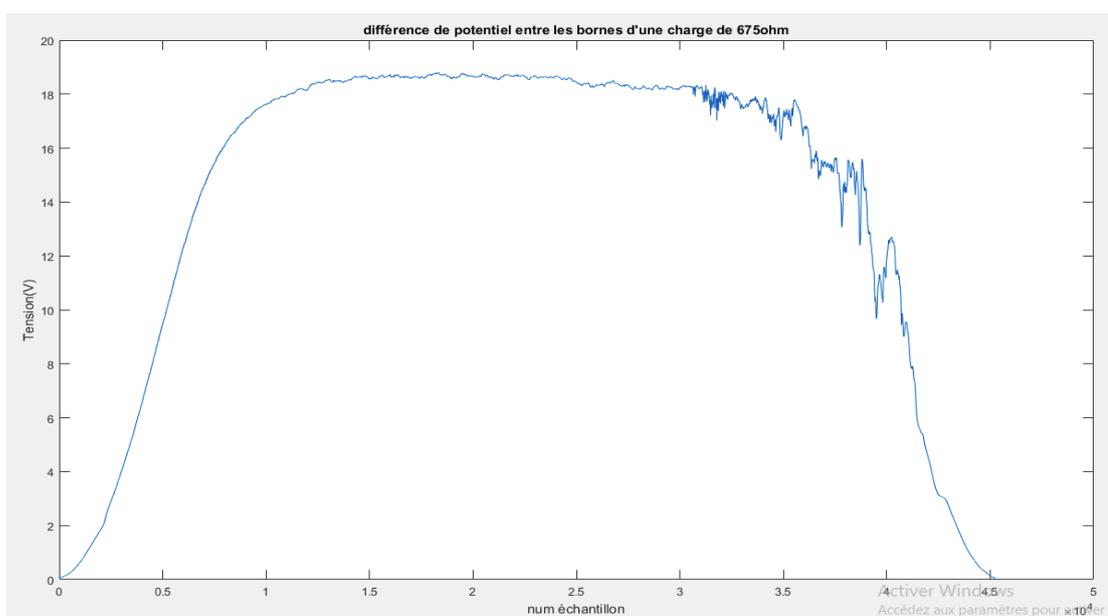


Figure 17 : La courbe de variation de la différence de potentiel entre les bornes du panneau solaire durant un cycle solaire quotidien.

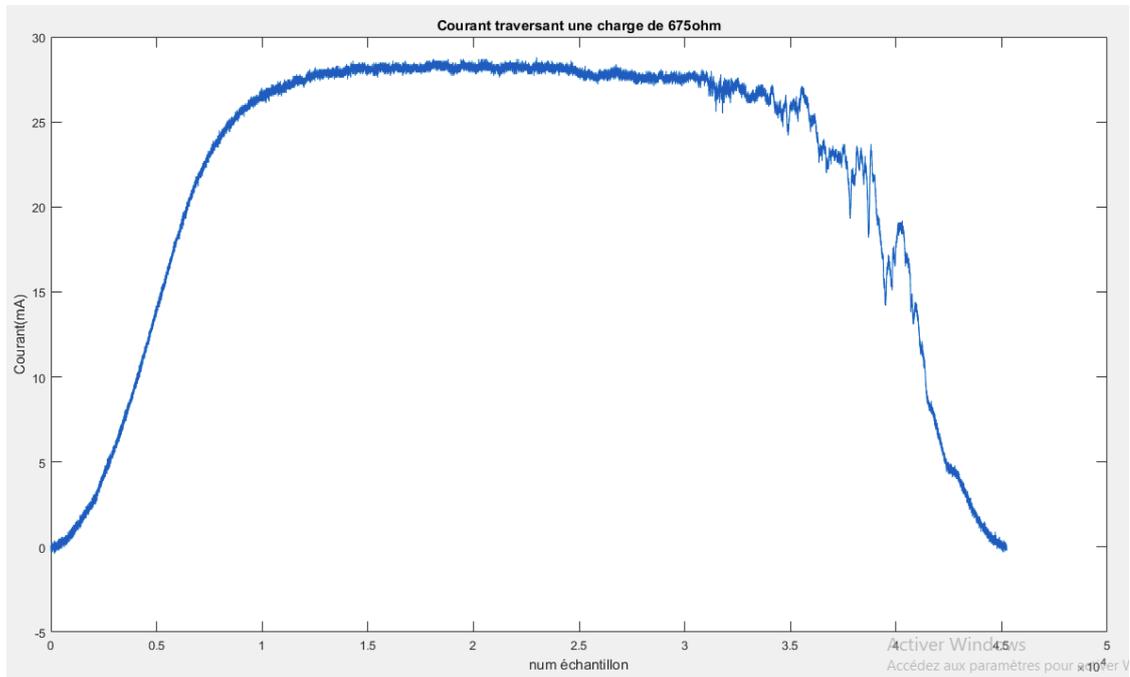


Figure 18 : La courbe de variation du courant traversant la charge (675ohm) durant un cycle solaire quotidien.

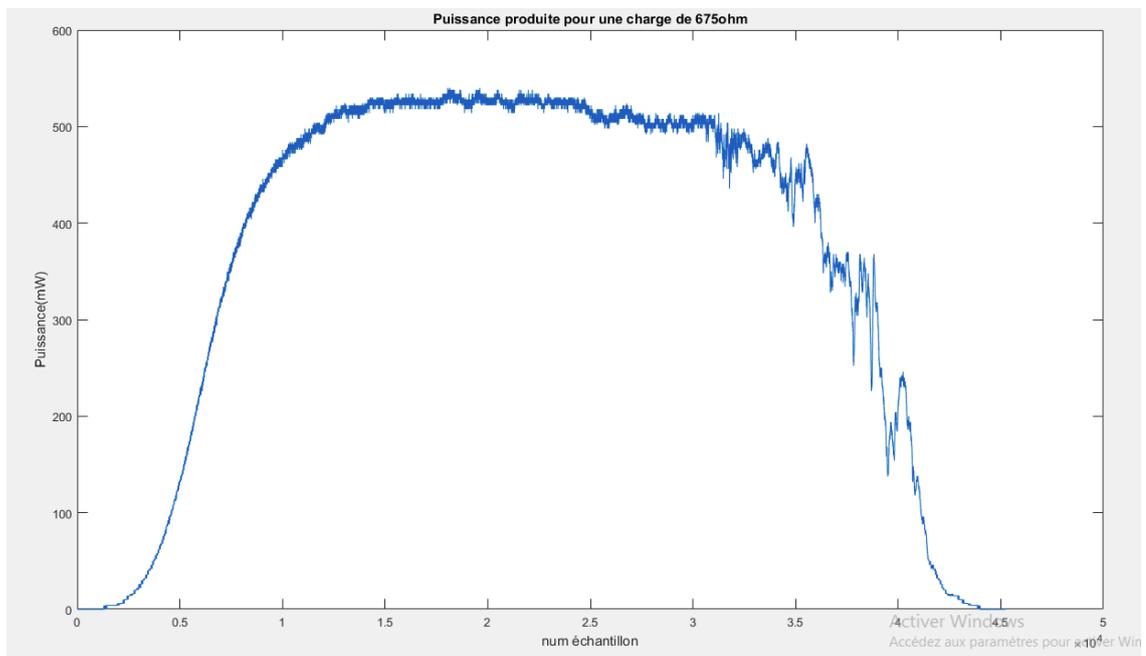


Figure 19 : La courbe de variation de la puissance produite par le panneau solaire durant un cycle solaire quotidien.

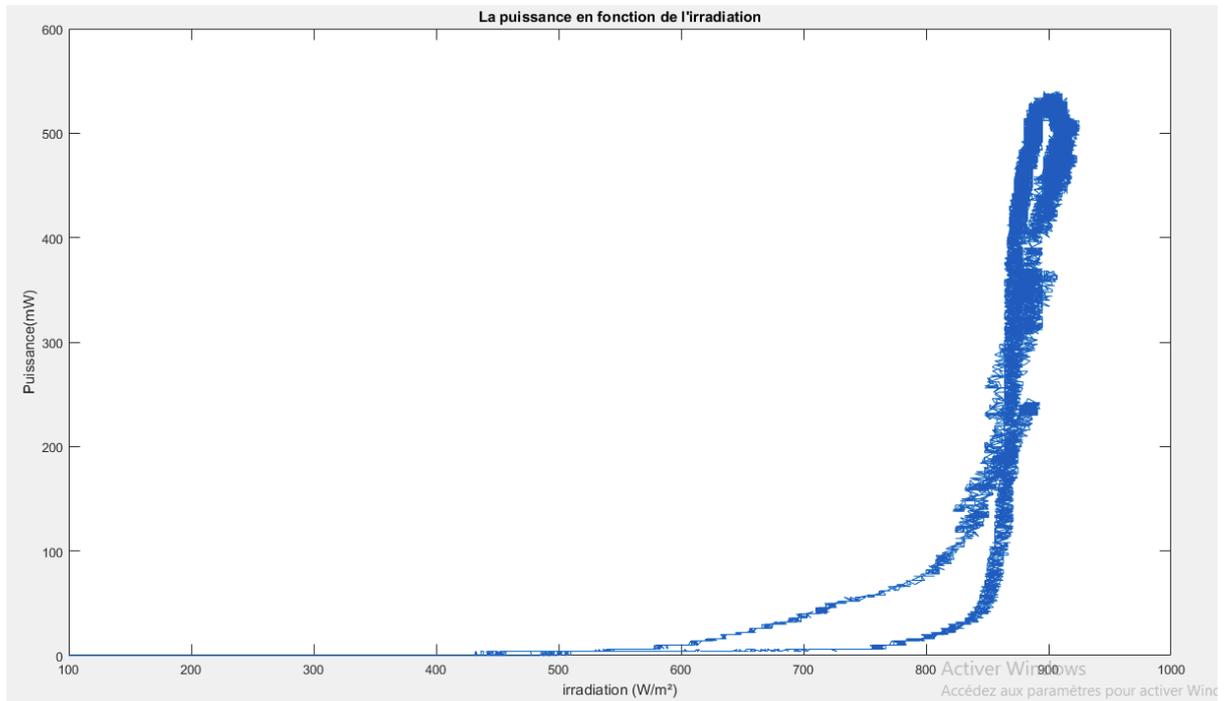


Figure 20 : La courbe de la variation de la puissance en fonction de l'irradiation.

Pour constater une baisse de production d'énergie, on compare la puissance instantanée produite avec la valeur que retourne la fonction de la puissance en fonction de l'irradiation du panneau établi dans des conditions exemplaires, et cela pour trancher si le rendement du panneau solaire est suffisant ou procéder à un nettoyage, pour cela on doit tracer la courbe de la puissance en fonction de l'irradiation en extraire sa fonction mathématique et la programmer dans un microcontrôleur pour qu'il puisse calculer la valeur optimale de la puissance à partir de l'irradiation collectée par le capteur d'irradiation et la comparer avec la puissance réelle produite mesurée par le capteur de puissance.

3. Approximation des courbes et l'extraction de l'équation mathématique:

Le logiciel Matlab dispose d'un outil permettant d'extraire approximativement des fonctions mathématiques de courbe de données obtenu expérimentalement, il permet aussi de

réduire le bruit affectant une courbe, c'est l'outil principal qui va être utilisé pour traiter les données échantillonnées et en extraire des fonctions mathématiques.

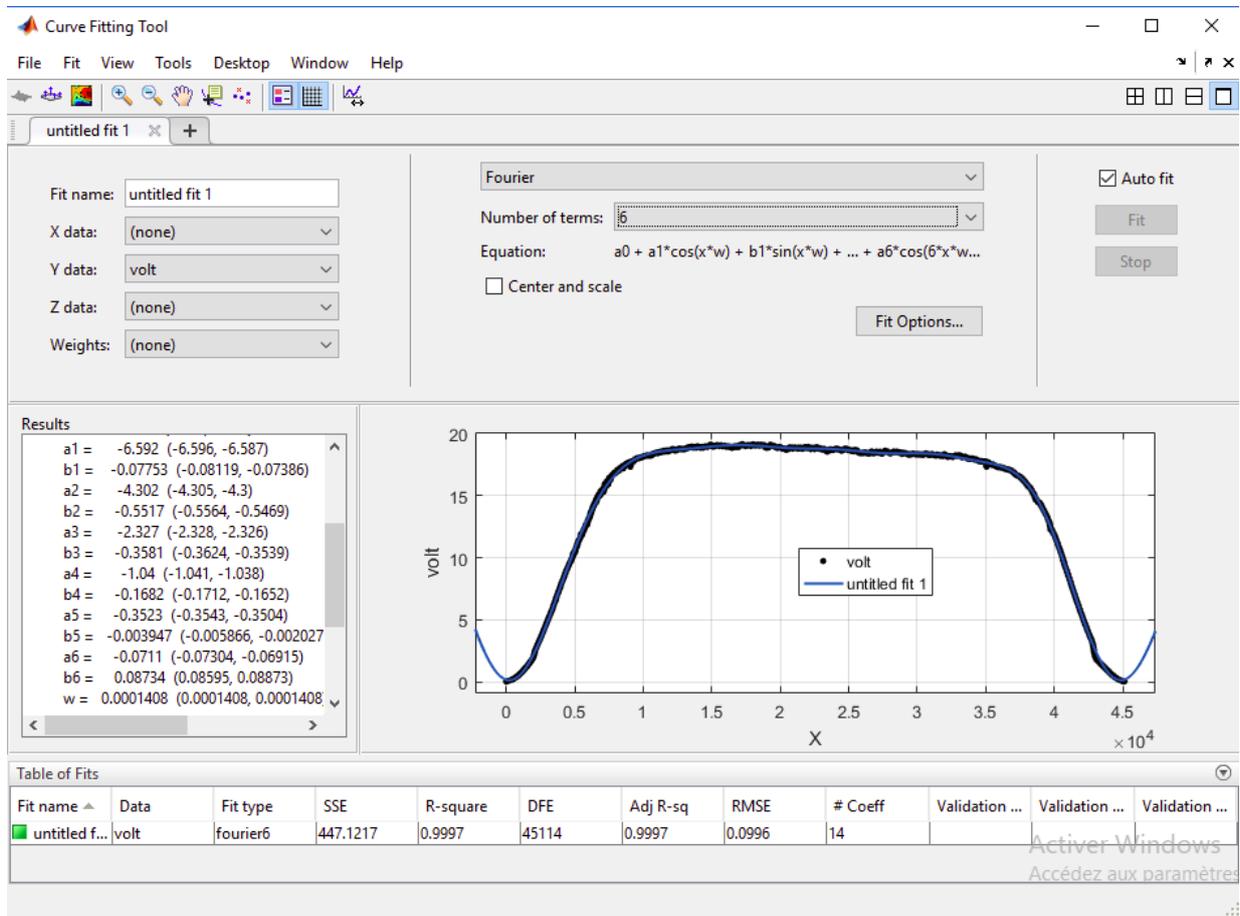


Figure 21 : La fenêtre de l'outil "curve fitting tool" qui montre l'approximation de la courbe d'irradiation en utilisant la méthode de Fourier.

Après avoir entré les échantillons de l'irradiation et de la puissance dans l'outil, il échoue à approximer la fonction avec une bonne précision et cela est dû au taux élevé de bruit que contient cette fonction.

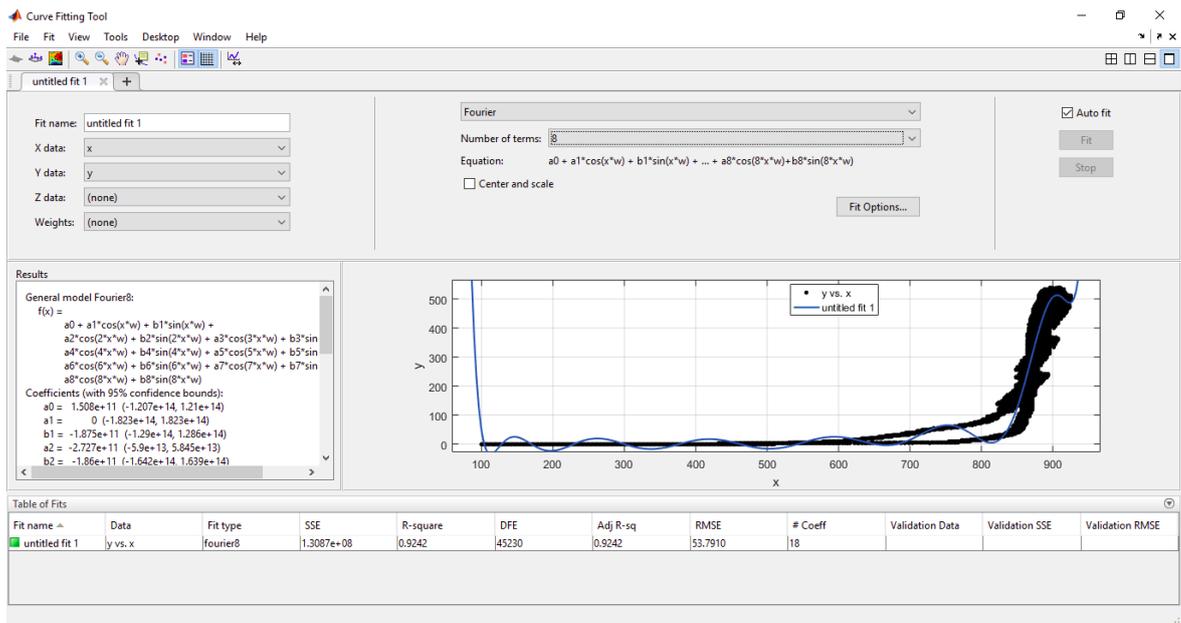


Figure 22 : L'approximation de la courbe d'échantillons.

La courbe en noir (figure 22) est l'ensemble des échantillons de la puissance en fonction de l'irradiation.

La courbe bleue (figure 22) est l'approximation que propose l'outil.

Après avoir agrandi une partie de la courbe obtenue à partir des échantillons, on remarque que les points sont liés sous forme d'une toile dense.

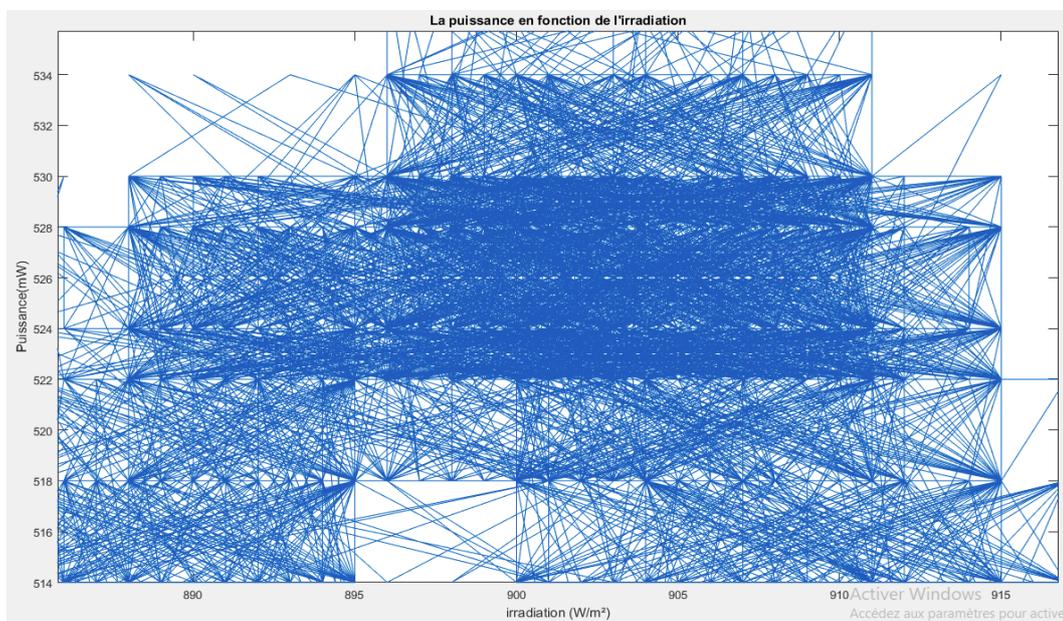


Figure 23 : Un agrandissement d'une partie la courbe de la puissance en fonction de l'irradiation.

Ce phénomène est interprété par le fait qu'il y a une grande intersection entre les intervalles d'irradiation pour des puissances voisines pour s'assurer de cela, les données ont été organisées dans une matrice nommée M qui va être utilisé par un script Matlab pour chercher pour chaque valeur de la puissance l'intervalle d'irradiation correspondant.

	1	2	3
15756	902	524	
15757	890	524	
15758	895	522	
15759	895	524	
15760	898	528	
15761	903	524	
15762	889	522	
15763	895	524	
15764	890	524	
15765	903	524	
15766	890	528	
15767	890	528	
15768	903	522	
15769	890	528	
15770	891	524	
15771	890	524	
15772	903	524	
15773	902	522	
15774	895	528	
15775	898	528	

Figure 24 : Une partie de la matrice M

Sur la première colonne on a les valeurs de l'irradiation, sur la deuxième on a les valeurs correspondantes de puissance

```
Editor - C:\Users\alpha\Documents\MATLAB\interval.m
interval.m x +
1 function R=interval(M)
2     j=1
3     for p=0:2:540
4         maxlum = 0
5         minlum = 1023
6         for i=1:1:45248
7             if M(i,2)==p && M(i,1)>maxlum
8                 maxlum=M(i,1)
9             elseif M(i,2)==p && M(i,1)<minlum
10                minlum=M(i,1)
11            elseif maxlum~=0 && minlum~=1023
12                R(j,1)=p
13                R(j,2)=minlum
14                R(j,3)=maxlum
15            end
16        end
17        if maxlum~=0 && minlum~=1023
18            j=j+1
19        end
20    end
21 end
```

Figure 25 : Le script Matlab permettant de générer la matrice d'intervalle

Le script "interval" permet de générer la matrice interval.

	1	2	3	4	5
140	456	872	919		
141	458	872	919		
142	462	873	919		
143	466	872	919		
144	468	873	922		
145	472	874	923		
146	476	874	923		
147	478	876	923		
148	482	876	919		
149	484	876	921		
150	488	880	923		
151	492	878	922		
152	494	880	923		

Figure 26 : Une partie de la matrice interval.

La matrice interval est composée de 251 lignes et 3 colonnes, la première colonne contient les valeurs de la puissance, la deuxième contient les valeurs d'irradiation minimale correspondant à la puissance, et finalement la troisième contient la valeur maximale de l'irradiation pour une valeur de puissance.

On remarque que les intervalles ont une intersection importante, ce qui signifie que les données sont inexploitable.

Après l'agrandissement d'une partie de la courbe de l'irradiation, on obtient la figure suivante qui montre une instabilité du capteur d'irradiation.

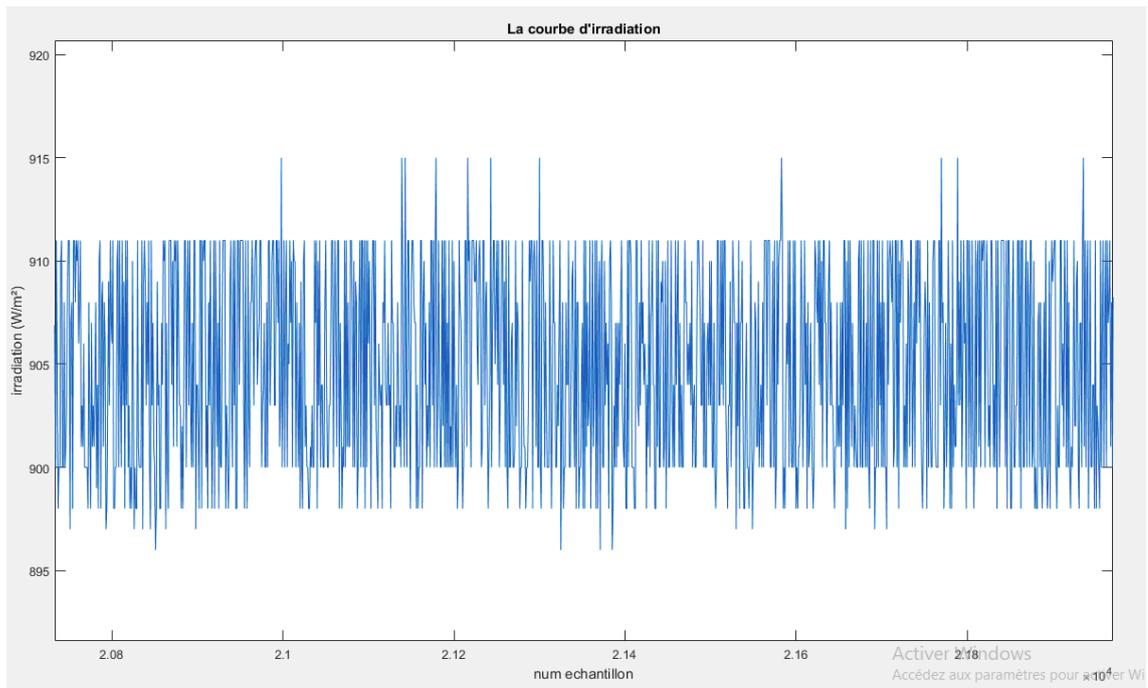


Figure 27 : Un agrandissement d'une partie de la courbe d'irradiation.

Sur le datasheet de la photorésistance utilisé on trouve le graphe suivant [12] :

Illuminance-Resistance Characteristics Curve

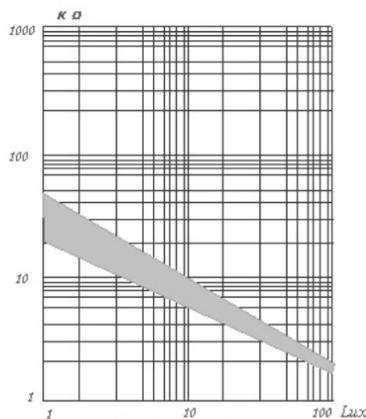


Fig. 1

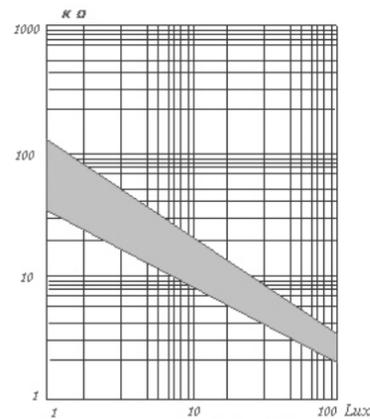


Fig.2

Figure 28 : La caractéristique de la résistance en fonction de l'illumination

Comme le montre la caractéristique ci-dessous la résistance décroît rapidement et atteint ces limites inférieures aux alentours de 1000 LUX.

Le graphe suivant établi expérimentalement décrit le phénomène avec plus de précision.

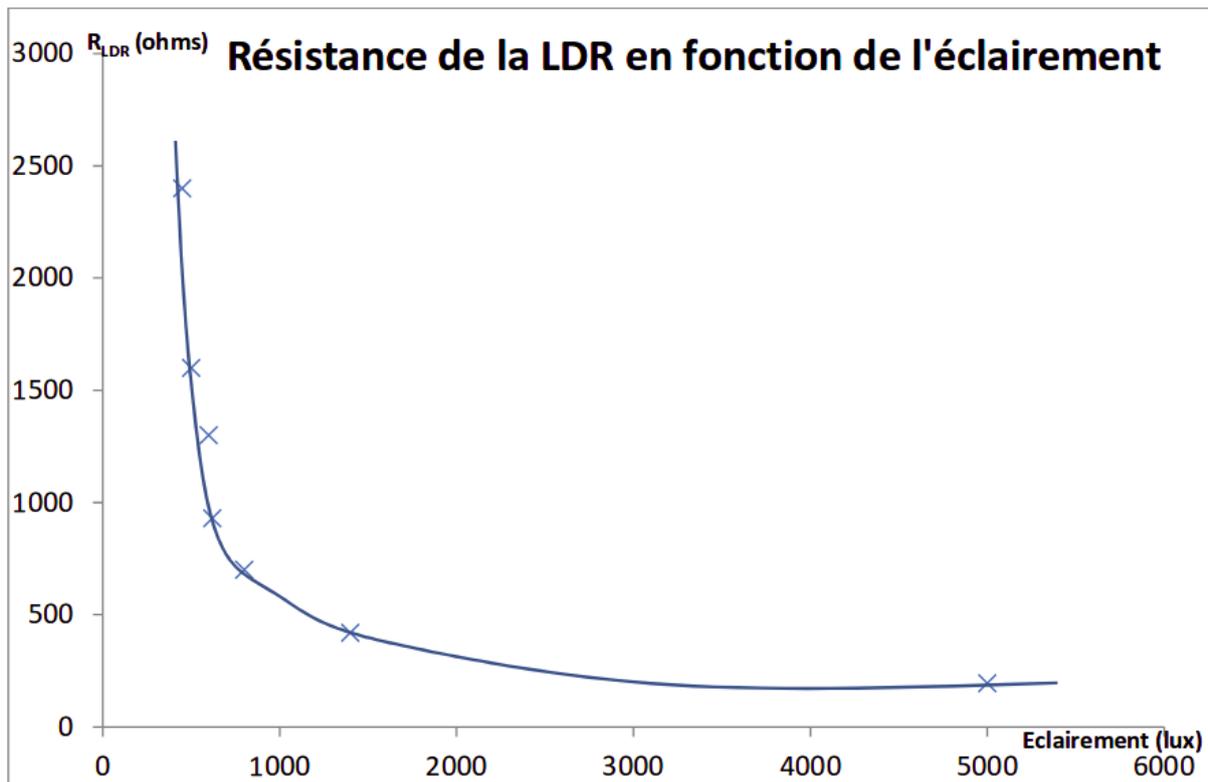


Figure 29 : La caractéristique expérimentale de la photorésistance.

On remarque sur la caractéristique expérimentale que la valeur de la résistance ne varie plus quand la valeur de l'éclairement dépasse 4000 lux sachant que l'éclairement en plein soleil dépasse les 50000 Lux.

4. La solution pour réduire le bruit:

Plusieurs essais ont été sur le capteur d'irradiation pour élargir son intervalle de fonctionnement et améliorer sa sensibilité, en note le changement de la résistance de mis a bas pour avoir une sensibilité maximale et couvrir la surface de la photorésistance avec un filtre pour réduire l'illumination, mais sans résultat, le taux de bruit reste élevé.

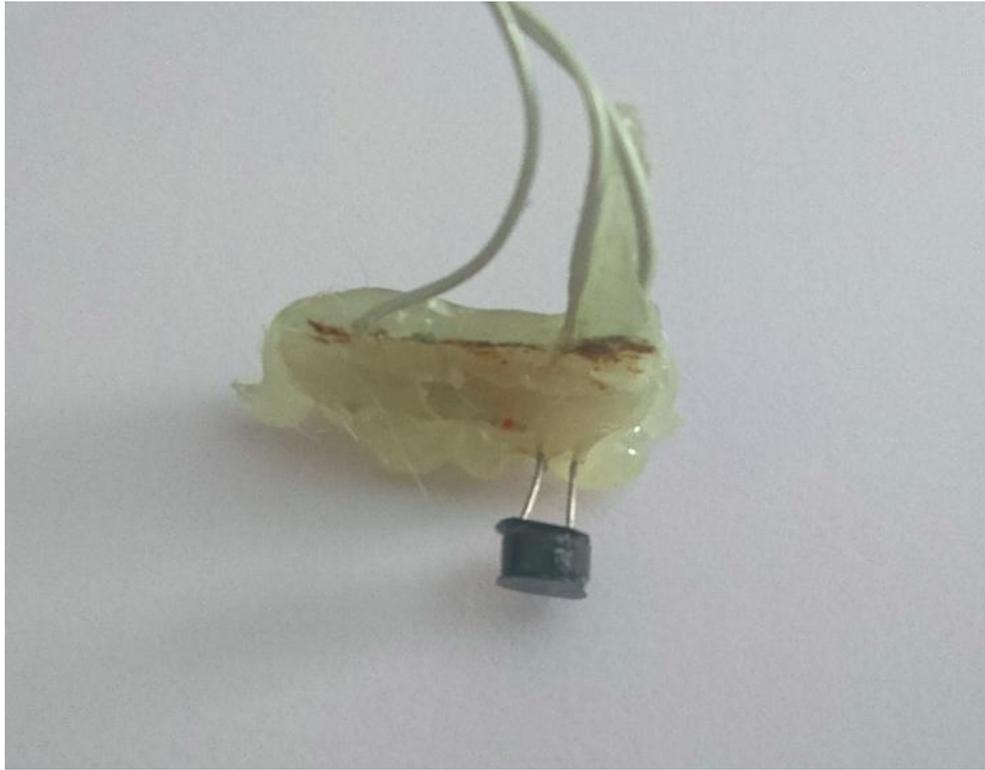


Figure 30 : Illustration du capteur après les modifications

Pour pallier au problème du bruit on a élaboré un nouveau capteur, qui consiste en une cellule photovoltaïque amorphe de petite dimension qui sera chargée avec une résistance telle qu'elle délivre sa puissance maximale, il reste qu'à mesurer la valeur de la tension aux bornes de la résistance pour en déduire la puissance produite par la cellule et en sachant la surface et l'efficacité de celle-ci on peut calculer l'irradiation à laquelle est exposé la cellule.

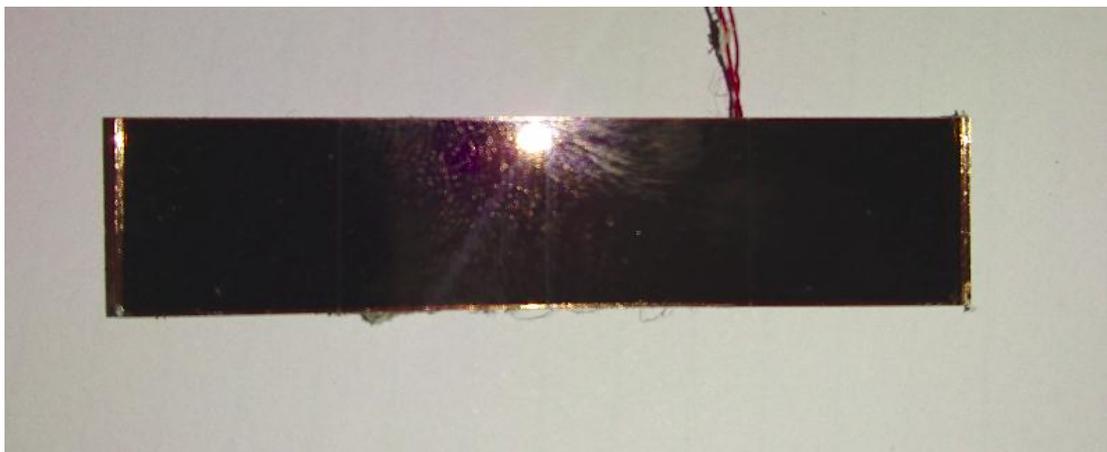


Figure 31 : Capteur d'irradiation fabriqué en utilisant une cellule

QFSOLAR 5514-4

La fréquence d'échantillonnage est aussi un facteur important qui peut générer du bruit, car toute variation de la luminosité sera enregistrée même celle d'un corps qui passe au-dessus du capteur ce qui résulte en une mesure faussée.

Après avoir branché la borne positive du capteur a une entrée analogique du microcontrôleur, la borne négative à la masse du système et réduire la fréquence d'échantillonnage à un échantillon par minute on reprogramme et on teste le système.

On récupère les données enregistrées sur la mémoire et on les traite par la même méthode utilisée précédemment, on obtient les résultats suivants:

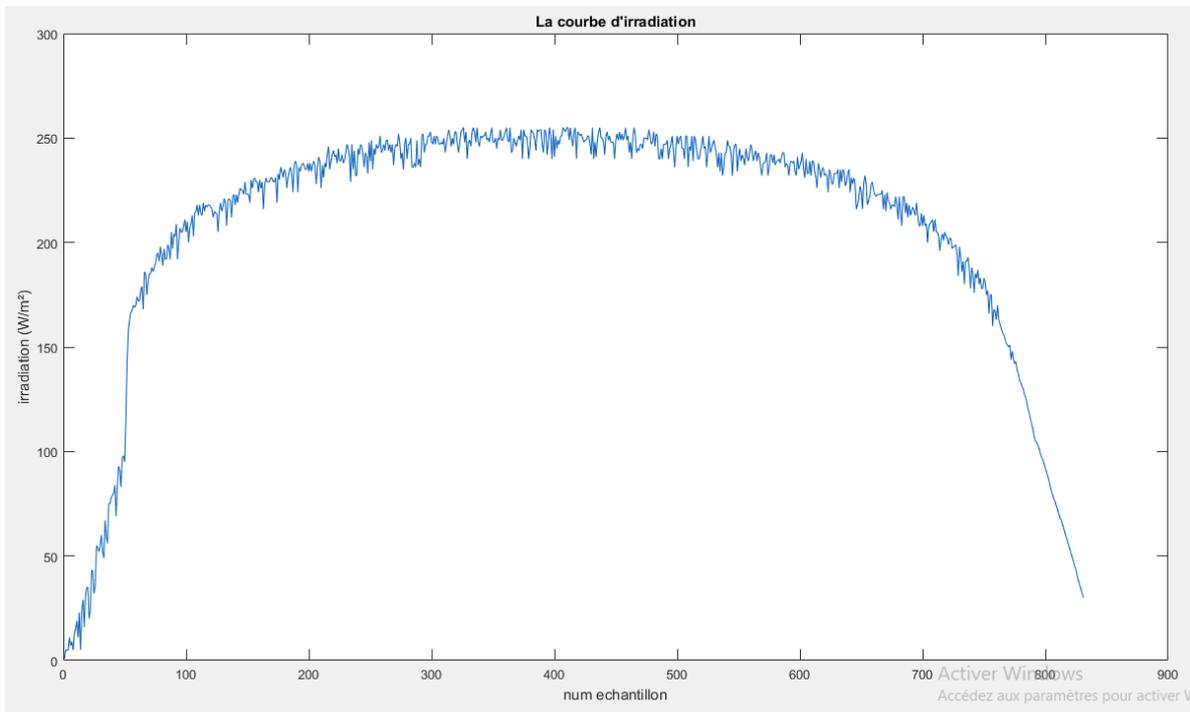


Figure 32 : La courbe de variation de l'irradiation durant un cycle solaire quotidien.

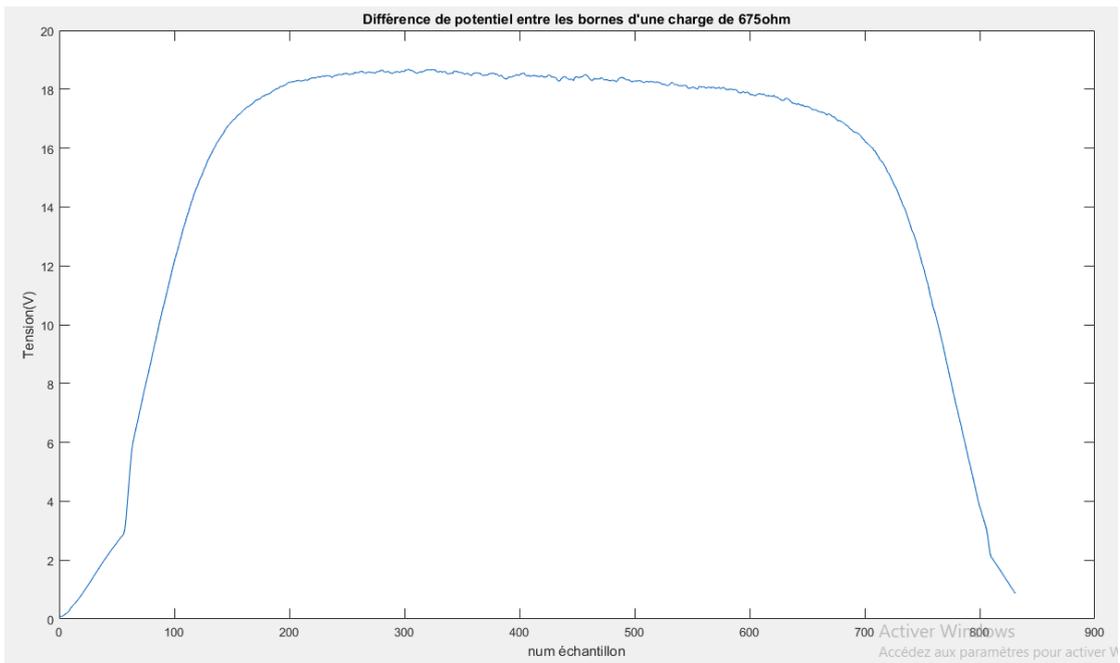


Figure 33 : La courbe de variation de la différence de potentiel entre les bornes durant un cycle solaire quotidien.

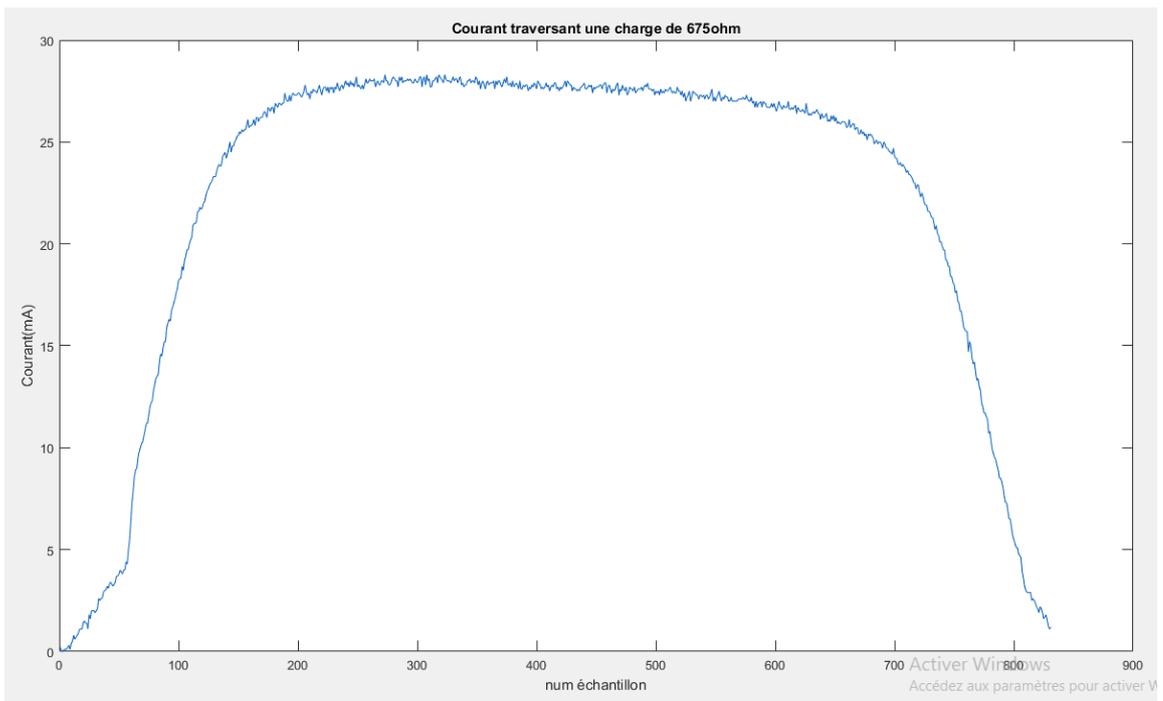


Figure 34 : La courbe de variation du courant traversant la charge (675ohm) durant un cycle solaire quotidien.

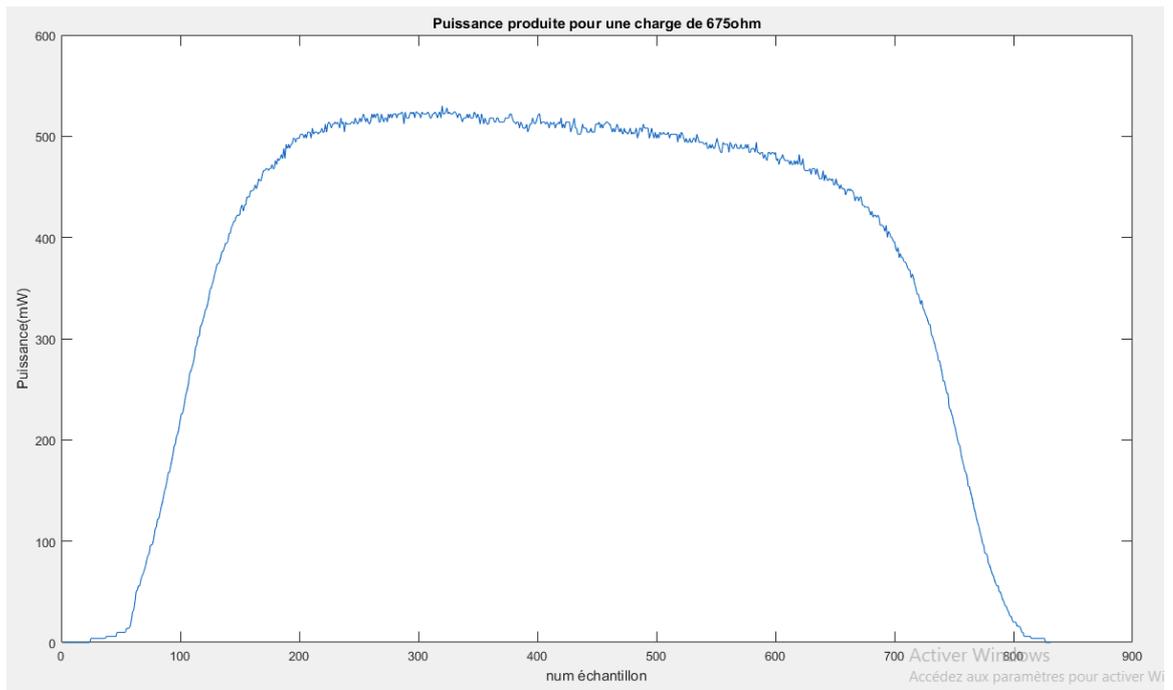


Figure 35 : La courbe de variation de la puissance produite par le panneau solaire durant un cycle solaire quotidien.

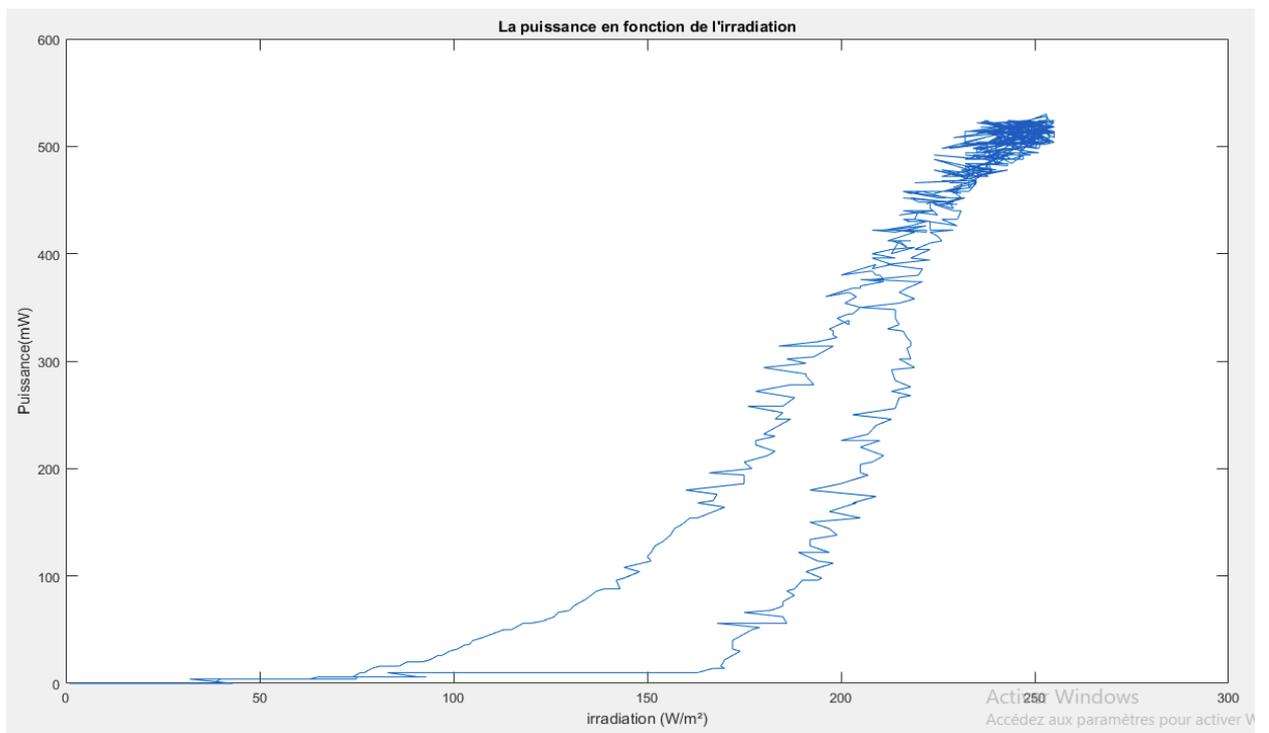


Figure 36 : La courbe de la variation de la puissance en fonction de l'irradiation.

Comme on remarque sur le figure 41 la courbe de la variation de la puissance en fonction de l'irradiation est beaucoup moins affectée par le bruit ce qui nous facilite extraction de sa fonction mathématique.

On commence par appliquer la fonction "smoothing spline" de l'outil curve fitting tool sur les courbes de base qui sont la courbe d'irradiation et de la puissance indépendamment pour réduire tant que possible le bruit, on utilise les données générées précédemment et on les combine dans une seule fonction avec xsmooth les données d'irradiation et ysmooth les données de la puissance.

On a tronqué la partie décroissante de la courbe, car l'outil ne parvient pas à l'approximer.

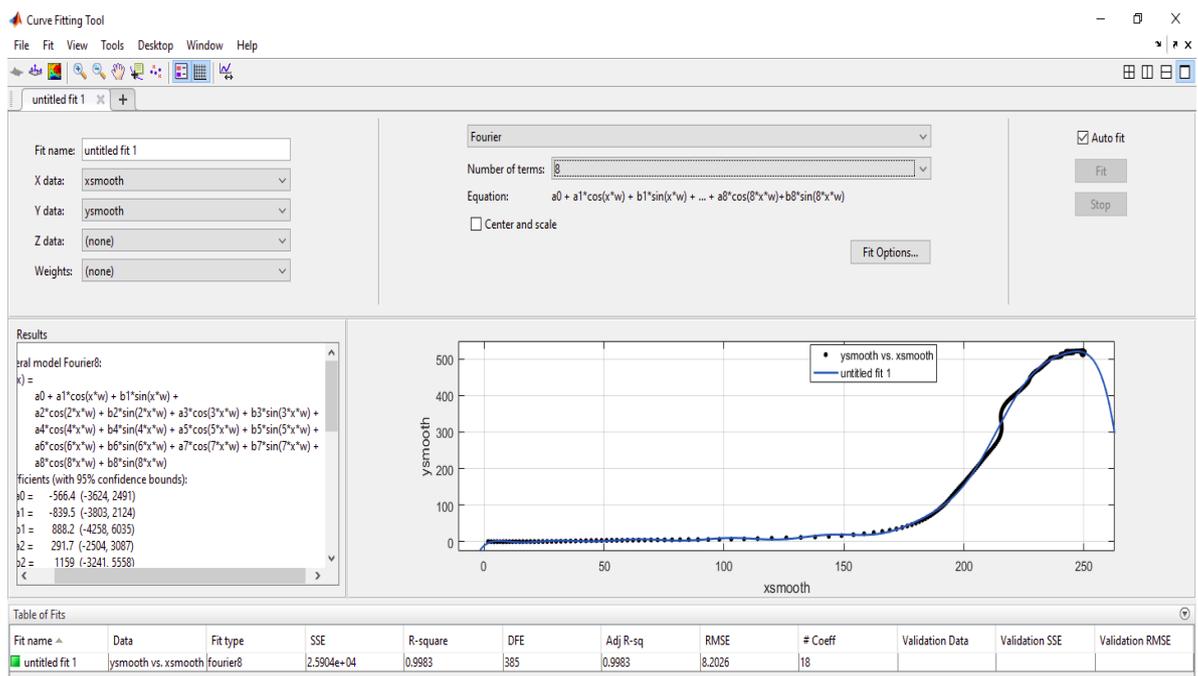


Figure 37 : Fenêtre curve fitting tool qui montre une approximation de la courbe de la puissance en fonction de l'irradiation

Comme on peut voir, l'outil parvient à approximer la fonction avec une bonne précision en utilisant la méthode de Fourier.

L'approximation donne la fonction suivante :

$$\begin{aligned}
f(x) = & -566.4-839.5*\cos(x*0.01727)+888.2*\sin(x*0.01727)+291.7*\cos(2*x*0.01727)+ \\
& 1159*\sin(2*x*0.01727)+906.5*\cos(3*x*0.01727)+256.4*\sin(3*x*0.01727)+ \\
& 470.2*\cos(4*x*0.01727)-407.6*\sin(4*x*0.01727)-27*\cos(5*x*0.01727)+ - \\
& 370.6*\sin(5*x*0.01727)-170.1*\cos(6*x*0.01727)-103.6*\sin(6*x*0.01727)+ - \\
& 76.25*\cos(7*x*0.01727)+37.74*\sin(7*x*0.01727)-0.3477*\cos(8*x*0.01727) + \\
& 24.47*\sin(8*x*0.01727)
\end{aligned}$$

Cette fonction peut facilement être programmée dans un microcontrôleur en utilisant le langage C et la bibliothèque math.h.

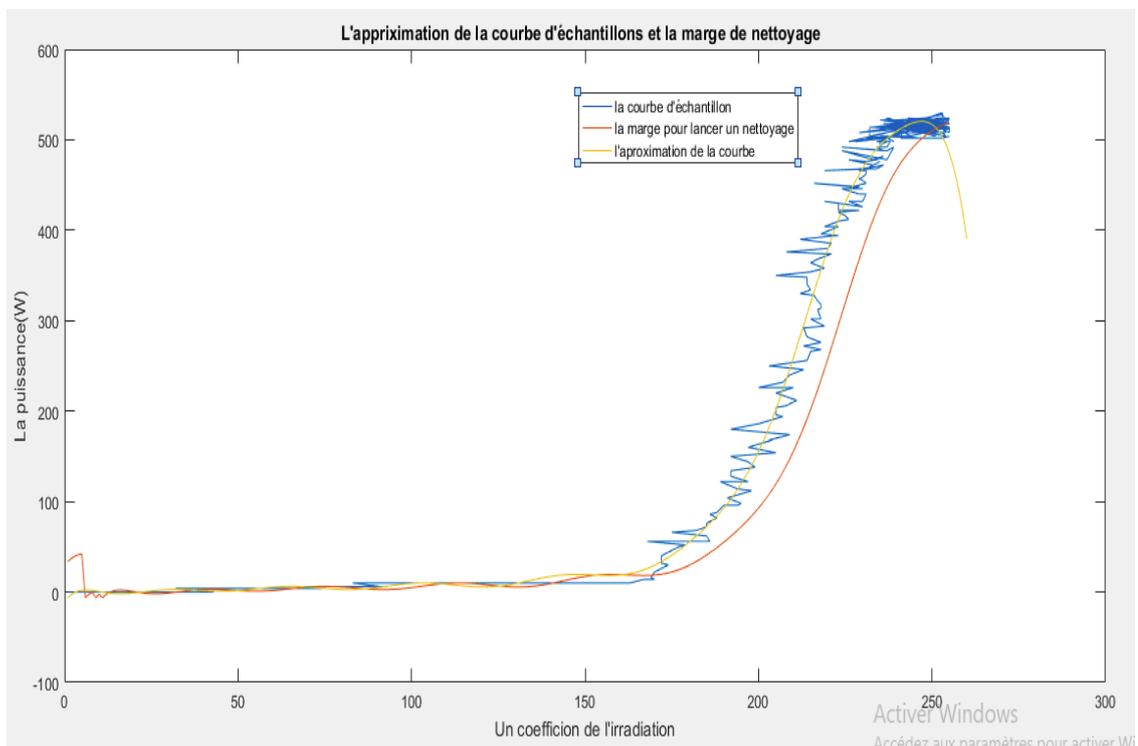


Figure 38: Les différentes courbes obtenues par l’outil curve fitting.

Courbe bleue (**Figure 38**) : La représentation des échantillons.

Courbe orange (**Figure 38**) : La représentation de la fonction mathématique issue des échantillons.

Courbe rouge (**Figure 38**) : La courbe qui détermine la limite du déclenchement du système de nettoyage.

La fonction de la courbe de marge (la courbe rouge) qui est correspondante à une baisse de production d'énergie d'environ 10%, elle sera préprogrammée dans le microcontrôleur tel que quand le capteur de la puissance va détecter des valeurs en dessous de cette courbe le microcontrôleur lancera un nettoyage.

Chapitre 4 : Le système mécanique de nettoyage:

1. Présentation du système :

Le système de nettoyage est une structure qui se déplace sur deux raille équipé de bille qui réduisent la friction, le déplacement du système est assuré par deux micro-servomoteur lié par une courroie qui entraine le système, l'humidification du panneau se fait par de l'eau qui est éjectée par plusieurs orifices présents sur la partie de tube de silicone se trouvant au-dessus du panneau , un moteur AC qui se charge de pressuriser l'eau dans le tube de silicone.

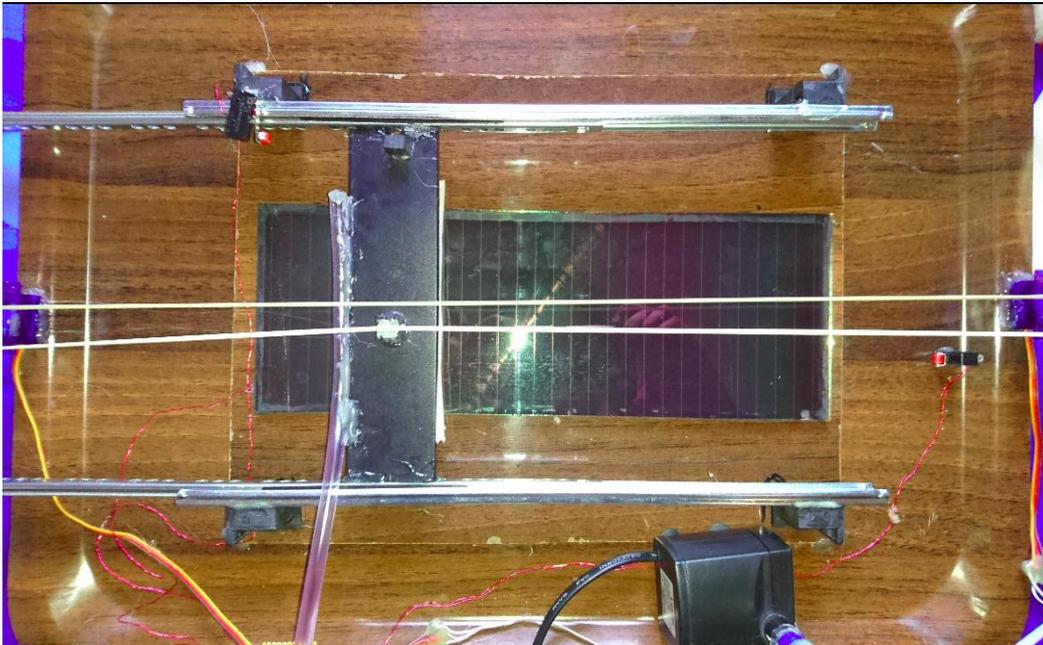


Figure 39: Le système de nettoyage.

2. La modification des servomoteurs:

Le micro servomoteur sont des moteurs pilotés en PWM et selon le signal d'entrés il se positionne sur un angle fixe, leur intervalle de rotation est de 0 à +180 degrés, on a choisi ce type de moteur, car il consomme peu d'énergie et génère un couple important en plus qu'il est léger et à un volume réduit. Pour l'utiliser dans notre application, il faudra le modifier afin qu'il puisse effectuer des rotations complètes à des vitesses variables.

Après avoir démonté le servomoteur, on identifie le potentiomètre, le circuit intégré et le bloc mécanique, les trois parties sur lesquelles on va agir. On commence par enlever le blocage mécanique des engrenages, après on enlève le blocage du potentiomètre et on le désactive en sectionnant ces connexions au circuit intégré puis après on connecte un pont diviseur de tension aux entrées du circuit intégré qui sont dédiées au potentiomètre.

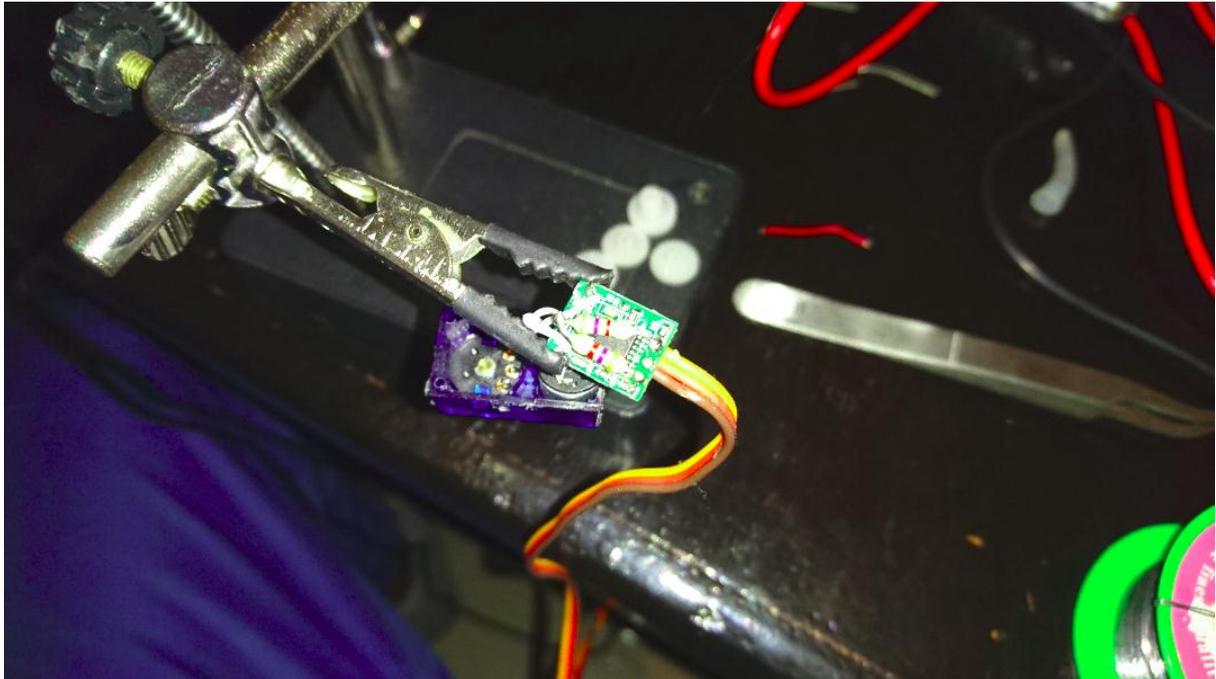


Figure 40 : Le circuit intégré qui pilote le servomoteur après avoir ajouté le pont diviseur de tension.

3. Le système de commande:

Le système de commande est à base de microcontrôleur ce dernier sera programmée pour détecter une baisse de puissance, fournir des signaux PWM au moteur et piloter un relais qui active la pompe à eau.

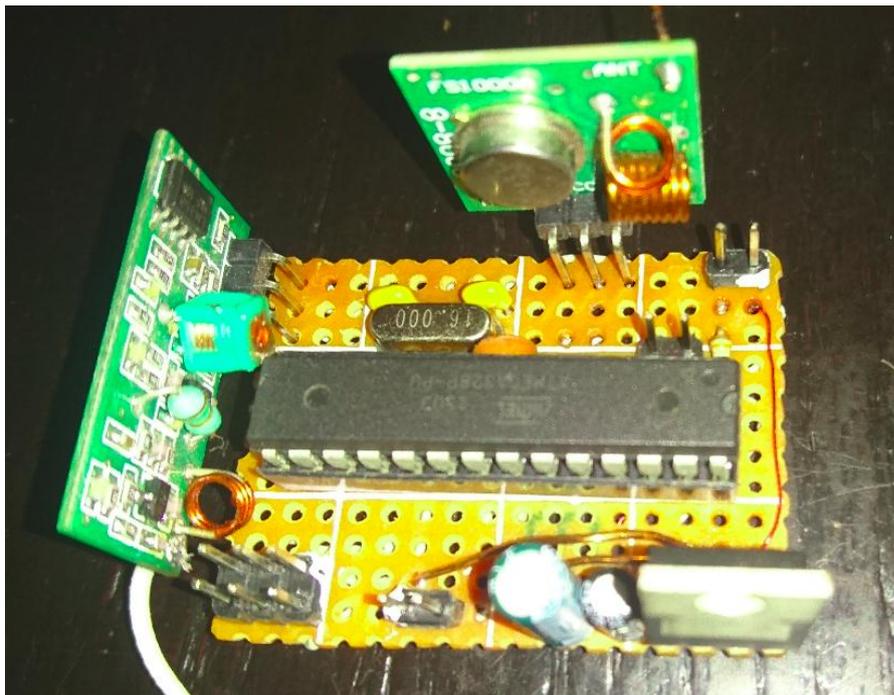


Figure 41 : Carte électronique à base d'un microcontrôleur ATMEL ATMEGA328p

Cette carte a été construite autour du microcontrôleur ATMEGA328P qui a tous les périphériques nécessaires pour assurer les fonctions citées préalablement et il consomme très peu d'énergie, la carte dispose d'un émetteur/récepteur radio fonctionnant à 433MHz pour transmettre et recevoir l'information sans avoir un accès physique à celle-ci, elle est munie de deux interfaces de communication qui peuvent être utilisées pour la programmation du microcontrôleur, la première étant ISP (In-System-Programming) et la deuxième un bus série (TX et RX), la carte est munie d'un régulateur de tension 5 Volts (7805) et des condensateurs de filtrage ce qui permet de l'alimenter avec des sources non régulées et avec des tensions allant jusqu'à 22V.

Ce système est compatible avec l'IDE Arduino et peut facilement communiquer avec des produits de cette Platform.

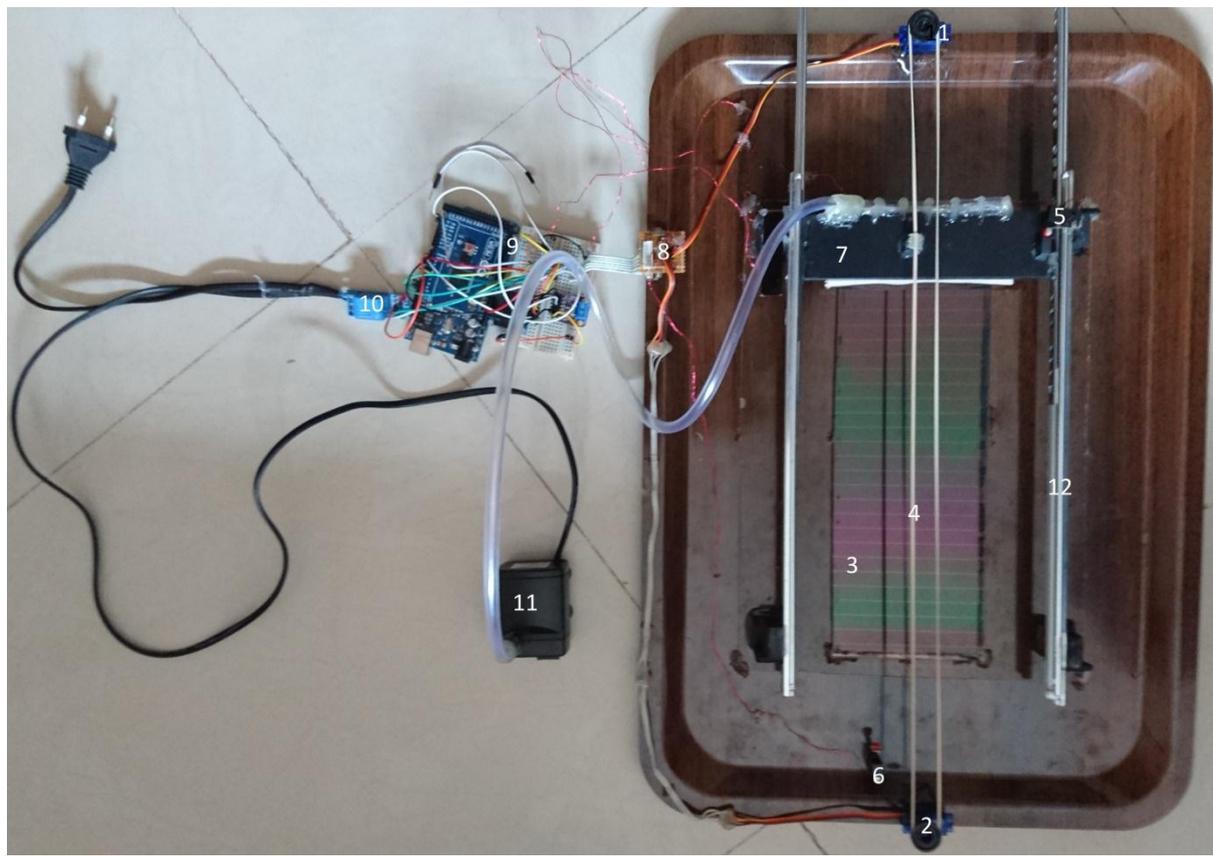


Figure 42 : Vue globale sur le système de nettoyage.

1	Servomoteur 1.
2	Servomoteur 2.
3	Cellule photovoltaïque.
4	Courroie de transmission.
5	Capteur de fin de course haut.
6	Capteur de fin de course bas.
7	Le support des trois éléments permettant le nettoyage.
8	Interface sur les capteurs de fin de course et les servomoteurs.
9	Système électronique de contrôle.
10	Relay d'activation de la pompe à eau.
11	Pompe à eau.
12	Barre coulissant

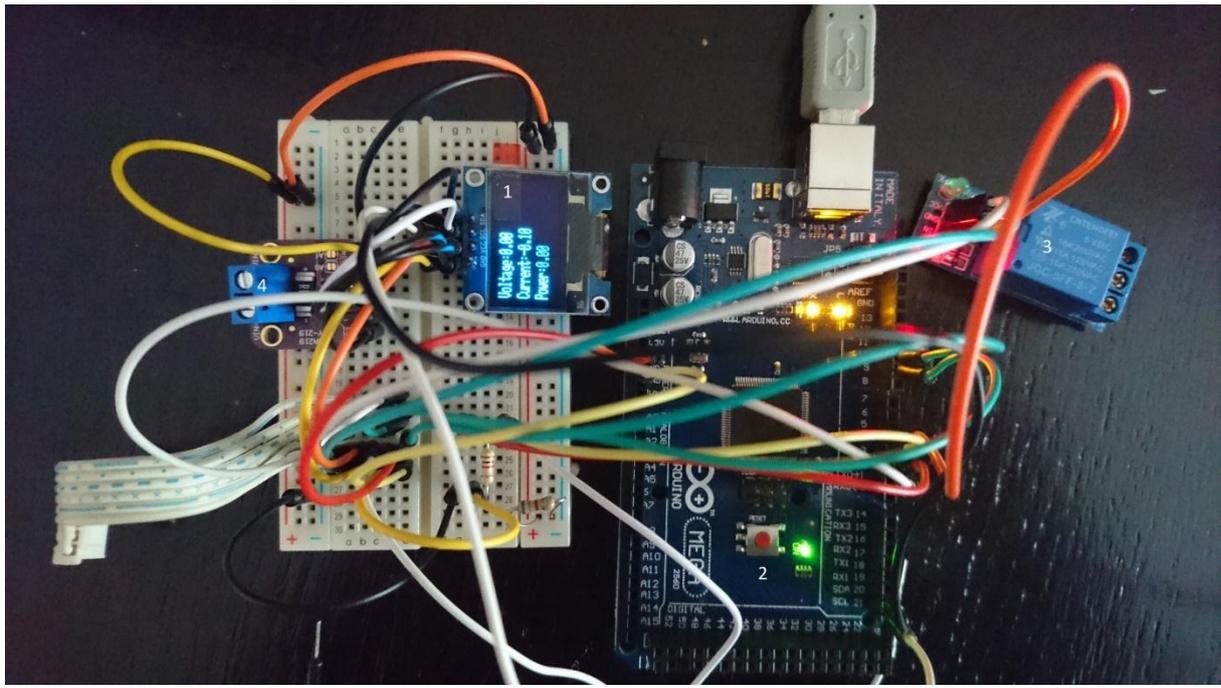


Figure 43 : Vue détaillée du système de commande.

1	Écran OLED pour afficher la tension, le courant et la puissance produite instantanément
2	Arduino Mega.
3	Relay d'activation de la pompe à eau.
4	Capteur de courant.

4. Fonctionnement du système de nettoyage :

Les surfaces des panneaux photovoltaïques sont sensible, elle peuvent facilement rayée être, les rayures peuvent causer la dispersion des rayons lumineux et aboutir à une légère perte de rendement, notre système de nettoyage préserve au plus la surface du panneau en la nettoyant sans causer la friction des particules de poussière et des débris a la surface du panneau, pour cela en premiers lieux le système humidifie la surface du panneau avec de l'eau afin de lubrifier le frottement de l'essuie glass qui vas ensuite venir pour chasser le mélange d'eau et de poussier de la surface, après viendra le rôle de l'essuyeur qui comme son nom l'indique essuie la surface du panneau pour ne pas y laisser des gouttelettes d'eau qui s'évaporèrent et laisserons des dépôts de matière sur la surface, l'essuyeur est fait de microfibre qui sont cossue pour le nettoyage des surfaces sensibles.

Le système de nettoyage ce déplace verticalement sur la surface du panneau, sur la limite supérieure et inférieure de ce dernier sont placé des capteurs de fin de course, la position initiale est sur le capteur de fin de course inférieure, une fois le nettoyage lancé le système ce déplace vers le capteur de fin de course supérieure en éjectant de l'eau et en nettoyant la surface, quand le capteur de fin de course est activé le système regagne sa position initiale.

Conclusion:

Le nettoyage des panneaux solaires est une opération essentielle qui doit être effectuée fréquemment pour éviter la baisse du rendement et de la rentabilité de l'installation, mais l'opération de nettoyage est coûteuse et doit être effectuée selon des critères et un calendrier bien étudié pour éviter des pertes économiques trop importantes, ce rapport a prouvé qu'il existe une solution pour détecter la baisse de rentabilité des cellules photovoltaïques et quand celle-ci dépasse un seuil établi par l'utilisateur l'opération de nettoyage est lancée automatiquement sans avoir besoin de calendrier de nettoyage préétabli qui sont peu précis ou de l'intervention humaine qui est coûteuse.

Le système réalisé préalablement peut héberger un réseau de neurones qui aura comme rôle de prendre la décision en se basant sur les informations fournies par le capteur, ce genre de système pourra facilement s'adapter au changement de l'environnement sans l'intervention humaine grâce à son habileté à apprendre.

Référence:

- [1] Multon, B., 2003. Production d'énergie électrique par sources renouvelables. *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique*.
- [2] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16759#c6053>
- [3] Mambrini, T., 2014. *Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies* (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- [4] Rivoire, B., 1982. Le solaire thermodynamique. *Groupe d'évaluation scientifique Thémis: de*.
- [5] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/effet-photoelectrique/>
- [6] <http://www.photovoltaique.info/L-effet-photovoltaïque.html>
- [7] http://www.prepa-cpe.fr/documents/Les_cellules_photovoltaiques.pdf et <http://www.photovoltaique.info/Les-technologies-de-cellules.html#Lacellulesolairephotovoltaïque>
- [8] http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20de%20communication/2010171642_Fichessolairethermodynamiqueintegralemai2010.pdf
- [9] Mejia, F., Kleissl, J. and Bosch, J.L., 2014. The effect of dust on solar photovoltaic systems. *Energy Procedia*, 49, pp.2370-2376.
- [10] Ruopu, Y.A.N.G., 2015. Economical Analysis of the Influence of Cleaning PV modules on Power Generating Cost of Photovoltaic Power Station.
- [11] <http://akizukidenshi.com/download/ds/senba/GL55%20Series%20Photoresistor.pdf>